

Desarrollo de un método de localización de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía basado en las componentes resistivas del sistema

Michael Correa Ospina

Desarrollo de un método de localización de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía basado en las componentes resistivas del sistema

Michael Correa Ospina

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Pereira, Junio de 2016

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Programa de Ingeniería Eléctrica.



Desarrollo de un método de localización de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía
basado en las componentes resistivas del sistema

©Michael Correa Ospina

Director: Ph.D Juan José Mora Flórez

Pereira, Junio de 2016

Programa de Ingeniería Eléctrica.

Universidad Tecnológica de Pereira

La Julita. Pereira(Colombia)

TEL: (+57)(6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

Agradecimientos

Primeramente a Dios por darme la capacidad para desarrollar este trabajo, además de escuchar en todo momento mis oraciones. A mis padres, Luciano Correa Vallejo y Beatriz Ospina Vallejo, por el apoyo moral y las sabias palabras que me ofrecieron a lo largo de mi formación profesional. A ellos les debo todo lo que soy ahora.

A mis amigos Juan David Cardona Cortés y Andrea Botero Marín, por tantos años de amistad brindada, acompañada de bonitas experiencias vividas. A mi novia, Juliana Flórez Bañol, por sus palabras de aliento y sus consejos de gran valor.

A los ingenieros Harold Andrés Cifuentes Chávez y Julián Gil González por brindarme su ayuda en situaciones de duda.

Dedicatorias

Dedico este trabajo, que con gran esfuerzo logré culminar, a Dios, ya que sin él nada es posible, y a mis padres, pues ellos luchan tanto como yo para que mis metas en la vida sean alcanzadas.

Resumen

En los sistemas eléctricos de potencia, se pueden presentar diversos casos de contingencias que son impredecibles e inevitables, lo que dificulta la prestación de un buen servicio de energía eléctrica por parte de los operadores de red. Dentro de estos casos, se encuentran las fallas ocasionadas por cortocircuitos en algún elemento del sistema. Uno de los elementos más vulnerables del sistema son las líneas de transmisión, debido a que estas recorren zonas con alto riesgo de contacto con los conductores. Una falla en una línea de transmisión tiene un gran impacto sobre el sistema, ya que estas transportan grandes cantidades de energía hasta los centros de distribución, para luego suplir a los usuarios finales. Si ocurre una falla en una línea de transmisión, se produce la desconexión de grandes cargas, además de posibles sobrecargas en otras líneas.

Por lo anterior, se hace necesaria la implementación de herramientas que ayuden a disminuir los tiempos de estado de falla de las líneas de transmisión. La forma de actuar rápido ante estos eventos, es conocer el punto de falla y repararlo. En los sistemas AC (o HVAC) de transmisión de energía, existen diversos métodos que permiten ubicar fallas de manera óptima (haciendo uso sólo de las mediciones de tensión y corriente) y con bajo porcentaje de error. Pero en sistemas DC (o HVDC) de transmisión de energía, la mayoría de métodos requieren de la instalación de dispositivos adicionales a los de medición, provocando un mayor costo en la localización de fallas.

En esta tesis, se analizan dos métodos de localización de fallas en líneas de transmisión HVDC, para ser comparados entre sí. Luego, se propone un método nuevo, que utiliza sólo mediciones de tensión y de corriente en los dos extremos de la línea. Entonces, el aporte principal de este trabajo, es el desarrollo de un método óptimo y de gran exactitud, que promueve al avance en la investigación de los sistemas HVDC de transmisión de energía.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos especificos	3
1.4. Principales aportes	4
1.5. Estructura de la tesis	4
2. Generalidades	6
2.1. Topologías de sistemas HVDC de transmisión de energía	6
2.1.1. Sistema monopolar con retorno por tierra	6

2.1.2. Sistema monopolar con retorno metálico	7
2.1.3. Sistema bipolar con retorno por tierra	7
2.1.4. Sistema bipolar con neutro metálico	8
2.1.5. Sistema Back-to-Back	9
2.2. Tipos de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía	10
2.2.1. Falla polo-tierra	10
2.2.2. Falla polo-polo	11
2.2.3. Falla polo-polo-tierra	11
2.3. Métodos de localización de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía	12
2.3.1. Método de ondas viajeras	14
2.3.2. Método de inyección de pulso de tensión	18
2.3.3. Método de distribución de voltaje	21
3. Método propuesto	26
3.1. Sistema monopolar	27
3.2. Sistema bipolar	30
3.2.1. Falla polo-tierra	30

3.2.2. Falla polo-polo y falla polo-polo-tierra	34
4. Pruebas y análisis de resultados	38
4.1. Sistema de prueba	39
4.2. Implementación de los métodos analizados	40
4.2.1. Método de inyección de pulso de tensión	40
4.2.2. Método de distribución de voltaje	41
4.2.3. Método propuesto	42
4.3. Resultados y análisis	42
4.3.1. Método de inyección de pulso de tensión	43
4.3.2. Método de distribución de voltaje	45
4.3.3. Método propuesto	47
4.4. Comparación entre métodos	50
5. Conclusiones y trabajos futuros	52
5.1. Conclusiones generales	52
5.2. Futuros trabajos de investigación	53
6. Anexos	57

TABLA DE CONTENIDO

IX

6.1. Anexo I: Diagramas de flujo	57
--	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La calidad de la energía es uno de los factores con el que los operadores de red deben cumplir, teniendo en cuenta aspectos como forma de onda y continuidad del servicio, entre otros. La continuidad del servicio, tema sobre el que esta tesis busca aportar, se ve afectada por la impredecible e inevitable ocurrencia de fallos en el sistema, especialmente en las líneas de transmisión que transportan grandes cantidades de energía.

Los fallos en las líneas de transmisión pueden provocar desconexiones prolongadas de la carga, sobrecargas en otras líneas, y pérdidas considerables de dinero para las empresas electrificadoras. Estos problemas son de gran importancia, ya que traen consigo consecuencias como penalizaciones por parte de las empresas reguladoras, congestión en el sistema, y daños en los equipos.

La solución a estos problemas es localizar y reparar rápidamente el punto de falla, logrando

disminuir tiempos de desconexión de la carga. En sistemas HVAC de transmisión de energía, existen diversos métodos de localización de fallas de manera óptima y con bajo porcentaje de error. Algunos de estos son métodos basados en el modelo de la línea (MBM), que utilizan sólo las medidas de tensión y de corriente en la subestación para obtener la distancia a la que se encuentra la falla [1]. Sin embargo, para los sistemas HVDC de transmisión de energía no se han desarrollado muchos métodos que permitan localizar fallas de manera óptima.

El problema a intervenir es, la escasez en los métodos óptimos y exactos para localizar fallas en las líneas de transmisión en DC.

1.2. Justificación

Los sistemas HVDC de transmisión de energía empiezan a hacerse necesarios en los nuevos diseños de redes eléctricas de alta potencia, ya que presentan una mayor eficiencia en la transmisión de la energía a largas distancias, comparados con los sistemas HVAC [2]. Sin embargo, en la literatura no se ha tratado de gran manera, la obtención de métodos óptimos que permitan localizar fallas en sistemas HVDC.

Las energías renovables toman cada vez más fuerza en proyectos de generación de energía eléctrica a nivel mundial, lo que implica la utilización de líneas HVDC para la transmisión de energía a largas distancias, por ejemplo, desde una lejana granja eólica hasta la subestación de destino. Consecuentemente, se hace necesario poseer un sistema que responda ante cualquier contingencia, convirtiendo la red en un elemento robusto con la capacidad de suministrar la energía con el menor tiempo de interrupción posible. Una herramienta clave para construir este sistema es un método eficaz para localizar las fallas que ocurran a lo largo de la línea.

Es importante entonces, el desarrollo de herramientas que contribuyan a la confiabilidad de

los sistemas HVDC.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar y validar un método para localizar fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía.

1.3.2. Objetivos específicos

- Indagar sobre las topologías más comunes de sistemas HVDC de transmisión de energía y los tipos de fallos que pueden ocurrir en estos sistemas.
- Revisar el estado del arte de los métodos para localizar fallos en sistemas HVDC.
- Analizar dos métodos de localización de fallos en HVDC, que propongan el menor número de elementos instalados en la red.
- Identificar las falencias de los métodos analizados mediante pruebas.
- Proponer estrategias de mejora de un método de localización de fallas.
- Validar y comparar los resultados obtenidos por las estrategias de mejora con los obtenidos por los métodos analizados.
- Reportar la investigación.

1.4. Principales aportes

Este trabajo presenta los siguientes aportes principales:

- Revisión de los métodos existentes para localizar fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía.
- Corrección del método de inyección de pulso de tensión, modificando una ecuación mal planteada. Lo anterior se muestra en la subsección 2.3.2 (páginas 20 y 21) del documento.
- Corrección del método de distribución de voltaje, mediante la modificación de una ecuación mal planteada. Esto se observa en la subsección 2.3.3 (página 24) del documento.
- Verificación de estos dos métodos mediante pruebas de simulación.
- Modificación del estado del arte, mediante el desarrollo de un nuevo y óptimo método que posee gran exactitud en la localización de la falla.

1.5. Estructura de la tesis

- Capítulo 2. En este capítulo se muestra, de manera general, las topologías de los sistemas HVCD de transmisión de energía, así como los tipos de falla que pueden ocurrir y los métodos para localizar estas fallas.
- Capítulo 3. Aquí se describe el método propuesto para la localización de fallas, especificando la forma de ejecutarlo para cada tipo de falla.
- Capítulo 4. Aquí se plantea un sistema de prueba en el que se generan fallas de tipo polo-tierra, con el fin de implementar dos de los métodos existentes y el método propuesto.

Además se realizan pruebas adicionales al método propuesto para verificar su validez. Se reportan los resultados obtenidos en estas pruebas y se realiza una comparación entre el método propuesto y los dos métodos analizados.

- Capítulo 5. En este capítulo se redactan las conclusiones del trabajo desarrollado y se proponen posibles trabajos futuros en el tema.

Capítulo 2

Generalidades

2.1. Topologías de sistemas HVDC de transmisión de energía

Existen diferentes configuraciones de las líneas de transmisión en DC, debido a las diversas necesidades de transporte de potencia y a las especificaciones de los equipos. Estas configuraciones varían desde sistemas monopolares hasta sistemas bipolares.

2.1.1. Sistema monopolar con retorno por tierra

Esta configuración utiliza un solo conductor para transportar la energía, y la tierra o el mar sirven como retorno conectándose mediante electrodos a las unidades convertoras. Generalmente se usa como etapa inicial de un sistema bipolar. Las unidades convertoras para esta topología varían desde unidades de 6 pulsos hasta unidades de 12 pulsos, conectadas en

paralelo o en serie [3].

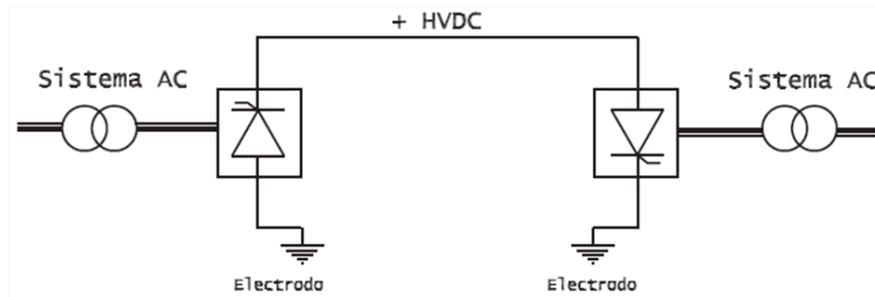


Figura 2.1: Sistema monopolar con retorno por tierra [3].

2.1.2. Sistema monopolar con retorno metálico

En este sistema se transmite la energía a través de un conductor a alta tensión, y se utiliza otro conductor como retorno a tensión reducida. El neutro, o conductor de retorno, se aterriza mediante un electrodo [3].

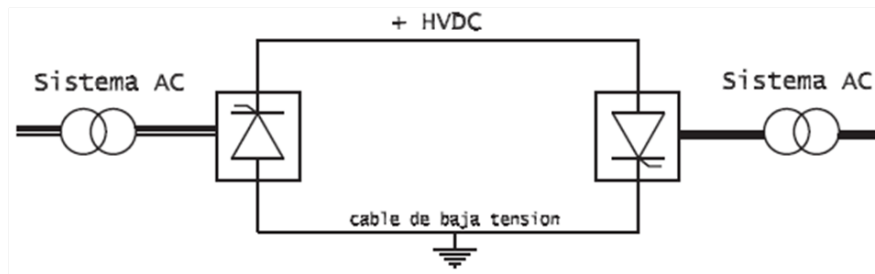


Figura 2.2: Sistema monopolar con retorno metálico [3].

2.1.3. Sistema bipolar con retorno por tierra

Este sistema se utiliza cuando la potencia que se debe transmitir supera la capacidad de un sistema monopolar. Está compuesto por dos polos, uno con polaridad positiva y el otro con

polaridad negativa, ambas respecto a tierra. Puede generarse un desequilibrio de corrientes de un valor muy pequeño, que toma el camino de tierra [3].

Esta configuración permite obtener un sistema monopolar con retorno por tierra cuando uno de los polos sale de operación, ya sea por mantenimiento o por averías [3].

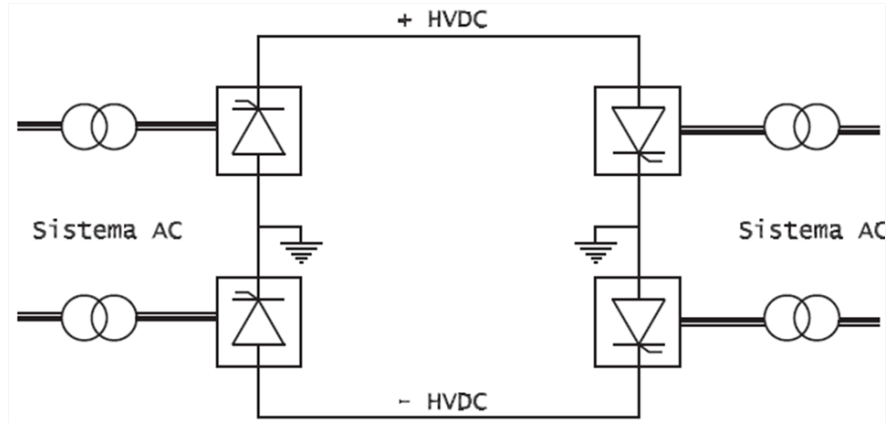


Figura 2.3: Sistema bipolar con retorno por tierra [3].

2.1.4. Sistema bipolar con neutro metálico

La implementación de esta topología se debe, principalmente, a la dificultad de transportar las corrientes de desequilibrio a través de tierra, cuando esta posee alta resistividad. Otra razón para usar neutro metálico, es que las corrientes de tierra tengan magnitudes considerables, y la distancia entre los dos nodos sean relativamente cortas. Al igual que la tierra en el sistema bipolar con retorno por tierra, el neutro metálico sirve como retorno cuando uno de los polos sale de operación [3].

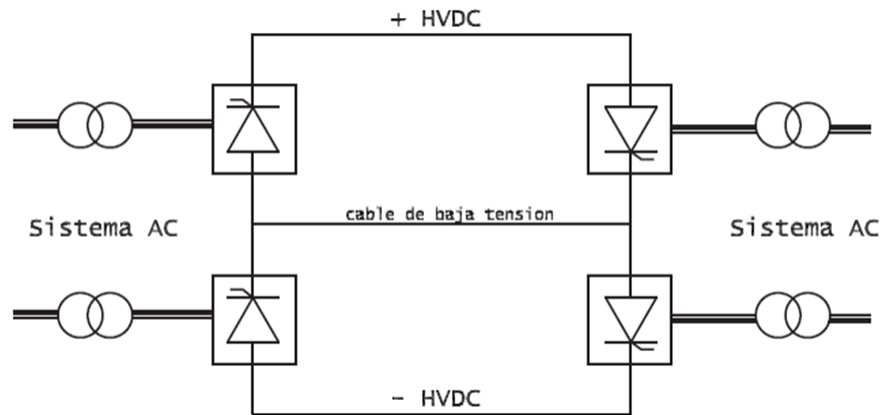


Figura 2.4: Sistema bipolar con neutro metálico [3].

2.1.5. Sistema Back-to-Back

Los sistemas Back-to-Back no poseen líneas de transmisión DC, y las unidades convertoras están ubicadas en la misma subestación, ya que son usados para transmitir potencia entre sistemas AC de diferentes frecuencias o sistemas que no se pueden sincronizar. Esta topología puede variar entre configuraciones monopolares y configuraciones bipolares [3].

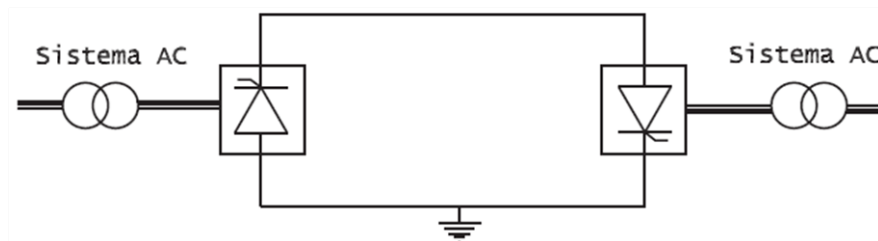


Figura 2.5: Sistema Back-to-Back [3].

2.2. Tipos de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía

Los tipos de fallas se pueden clasificar en dos grandes grupos: falla serie y falla paralelo. La falla serie es aquella en la que el conductor se rompe, pero no hace contacto con tierra o con otro conductor. La falla paralelo es la provocada por la unión de un conductor con tierra o con otro conductor [1]. Esta tesis se enfoca en las fallas de tipo paralelo, y hace una breve revisión de estas en los sistemas HVDC. Las fallas tipo serie están fuera del alcance de esta tesis.

2.2.1. Falla polo-tierra

Esta falla ocurre cuando uno de los polos hace contacto con tierra. Si el sistema es monopolar, se interrumpe por completo el flujo de potencia entre los terminales del mismo. En cambio, si el sistema es bipolar, se saca de funcionamiento sólo el polo que sufrió la falla, y a través del otro polo se transporta la mitad de la potencia, utilizando la tierra como retorno [2].

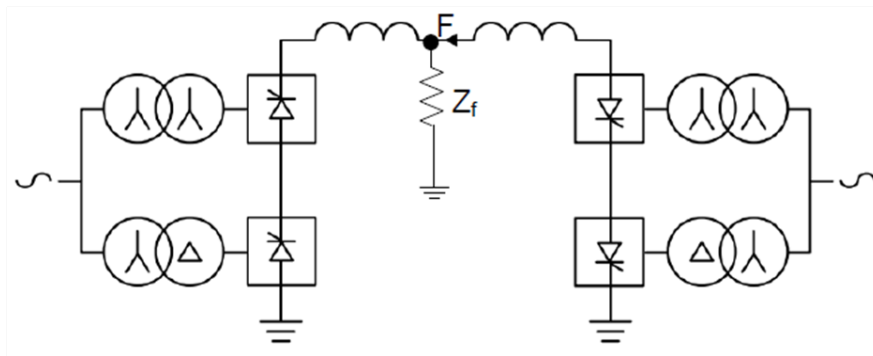


Figura 2.6: Falla polo-tierra en un sistema monopolar [2].

2.2.2. Falla polo-polo

Esta falla sólo puede ocurrir en un sistema bipolar, y se da cuando ambos polos hacen contacto entre sí. Lo anterior implica que todo el sistema salga de funcionamiento [2].

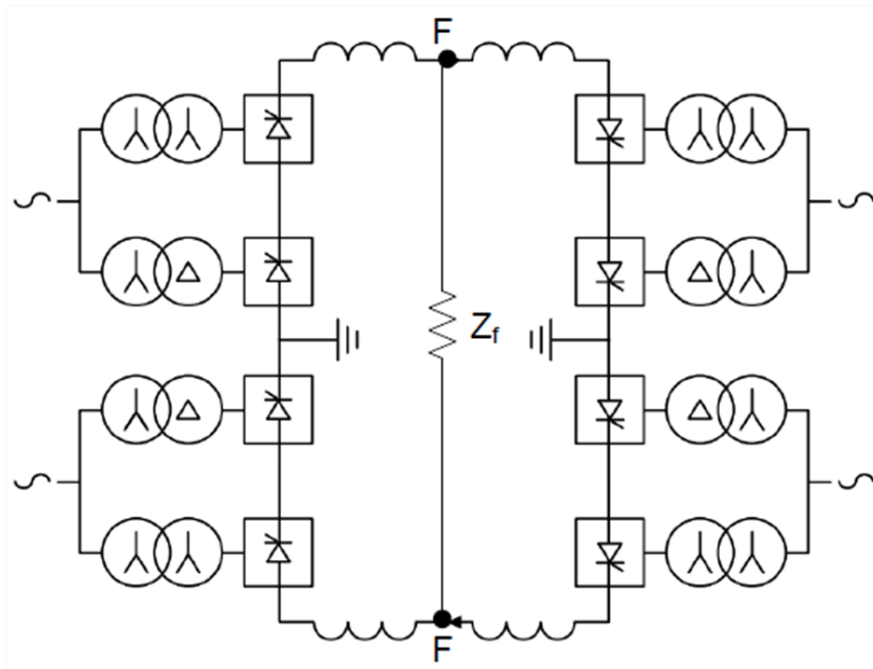


Figura 2.7: Falla polo-polo en un sistema bipolar [2].

2.2.3. Falla polo-polo-tierra

Este tipo de falla sucede cuando los dos polos de un sistema bipolar hacen contacto entre sí a través de tierra. Esto requiere que se saque de funcionamiento la totalidad del sistema [2].

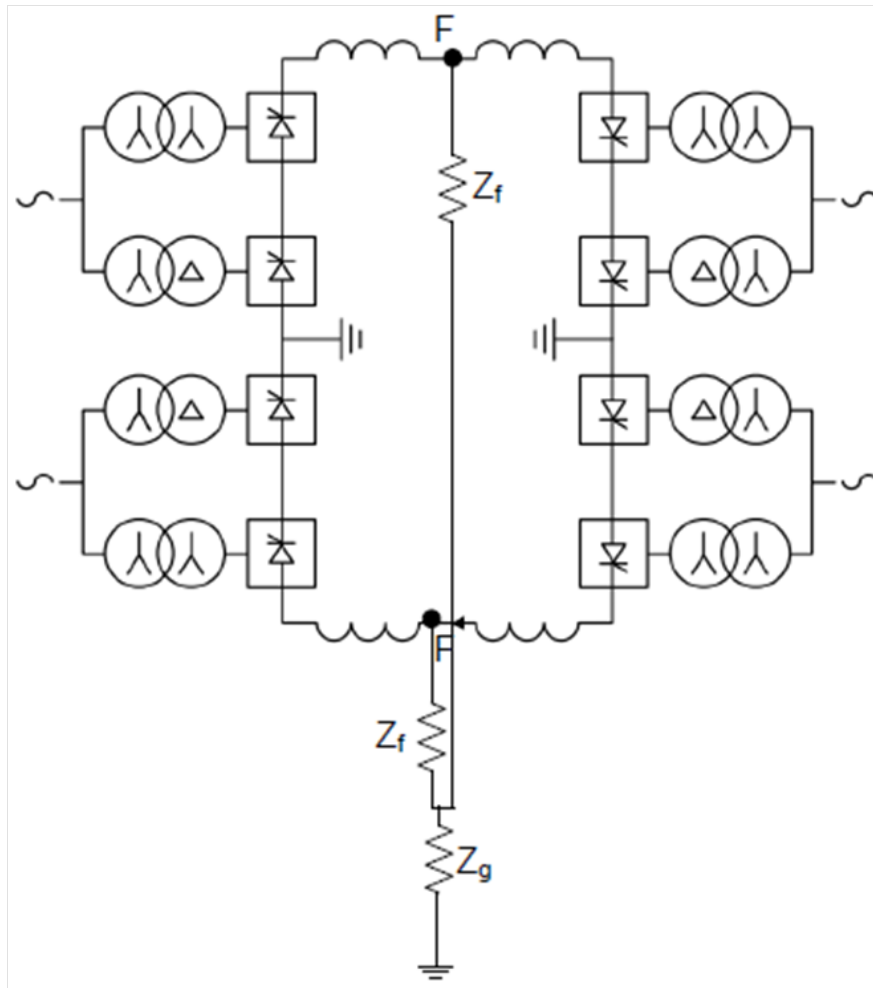


Figura 2.8: Falla polo-polo-tierra en un sistema bipolar [2].

2.3. Métodos de localización de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía

Los métodos de localización de fallas para sistemas HVDC, se clasifican en métodos basados en la impedancia de la línea y en métodos basados en ondas viajeras, siendo estos últimos los más comerciales. En general, los métodos basados en ondas viajeras miden el tiempo en

el que un pulso electromagnético recorre un conductor bajo falla y, conociendo la velocidad a la que esta onda se desplaza sobre el medio, se calcula la distancia recorrida [4].

Algunos de estos métodos, requieren que la línea esté desenergizada y aplican sólo para fallas permanentes; además de que requieren de personal y equipo especializado. Otros métodos de más fácil aplicación, utilizan aparatos de medición en ambos extremos de la línea, que guardan información proveniente de los pulsos generados por la ocurrencia de la falla. Estos datos almacenados se utilizan para encontrar la mayor componente de frecuencia de la onda viajera generada por la falla; con esta información y conociendo la velocidad de propagación de la onda, se puede calcular la localización de la falla. Estos métodos no requieren personal y equipo especializado, y su desarrollo es rápido; sin embargo, su gran desventaja es que no todas las fallas producen pulsos detectables para los aparatos de almacenamiento de datos [4].

Los métodos basados en la impedancia de la línea son ampliamente usados en los sistemas AC, debido a su bajo costo y su simplicidad. Es posible usar estos métodos en sistemas DC, debido a que en principio, los parámetros primarios para las líneas AC y las líneas DC son similares. La diferencia está en que estos métodos utilizan modelos de línea en el dominio de la frecuencia para las líneas AC, pero en los sistemas DC no existe frecuencia fundamental. Por lo tanto, el principal problema está en encontrar un modelo de línea en el dominio del tiempo que permita adaptar los métodos basados en la impedancia de la línea de los sistemas AC a los sistemas DC. Debido a la dificultad en la implementación de un modelo de línea para estos métodos, la literatura en el tema es escasa [4].

2.3.1. Método de ondas viajeras

Este método se basa en los fenómenos de reflexión y refracción de las ondas. Cuando una onda encuentra una discontinuidad sobre el medio en que se desplaza, parte de esta onda se refleja y otra parte se refracta. En circuitos eléctricos, una discontinuidad es un cambio de impedancia, ya sea por la terminación del conductor, por el punto de unión de dos conductores, o por un punto de falla [2].

En una línea de transmisión bajo falla, se genera una onda viajera en el punto de falla, que viaja hasta cada terminal de la línea y rebota hacia atrás y hacia adelante hasta que se extingue. Esto se debe a que tanto los terminales de la línea como el punto en falla, son discontinuidades o cambios de impedancia. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede calcular la distancia a la que ocurre una falla, si se conoce la velocidad de propagación de la onda sobre el conductor y se mide el tiempo en que esta se propaga [2].

A continuación se muestra la forma de localizar la falla para diferentes tipos de líneas de transmisión HVDC, usando ondas viajeras.

Sistema homogéneo

Es una línea de transmisión con una sola sección de conductor.

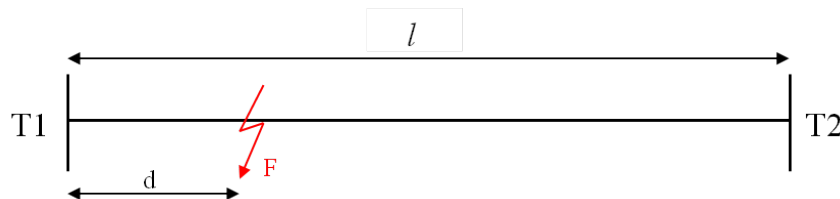


Figura 2.9: Falla en una línea homogénea.

Para encontrar la distancia entre el terminal T1 y el punto de falla, se utiliza la ecuación [2]:

$$d = \frac{l - (t_2 - t_1) \cdot v}{2} \quad (2.1)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

Donde l es la longitud total de la línea; t_1 y t_2 , son el tiempo de propagación de la onda desde el punto de falla hasta el terminal T1 y hasta el terminal T2, respectivamente; v es la velocidad de propagación de la onda sobre el conductor; L y C , son la inductancia y la capacitancia del medio de propagación, respectivamente.

Sistema híbrido de dos secciones

Está conformado por una sección de cable y otra sección de línea aérea. En este caso, se debe tener en cuenta el efecto de la junta entre las dos secciones.

En la Figura 2.10 se muestra una falla en la sección de cable de la línea de transmisión.

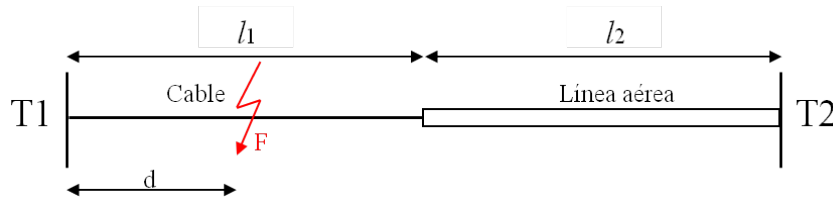


Figura 2.10: Falla en la sección de cable de una línea híbrida de dos secciones.

La localización de la falla, medida respecto al terminal T1, se obtiene mediante la ecuación (2.3) [2].

$$d = \frac{1}{2} \cdot \left(l_1 + \frac{v_1}{v_2} l_2 - (t_2 - t_1) \cdot v_1 \right) \quad (2.3)$$

Donde l_1 y l_2 , son la longitud de la sección de cable y la longitud de la sección de línea aérea, respectivamente; v_1 y v_2 , son las velocidades de propagación de la onda sobre la sección de cable y sobre la sección de línea aérea, respectivamente.

Ahora, para una falla en la sección de línea aérea, como se muestra en la Figura 2.11, se utiliza la ecuación (2.4) para encontrar la distancia desde el terminal T1 hasta el punto de falla [2].

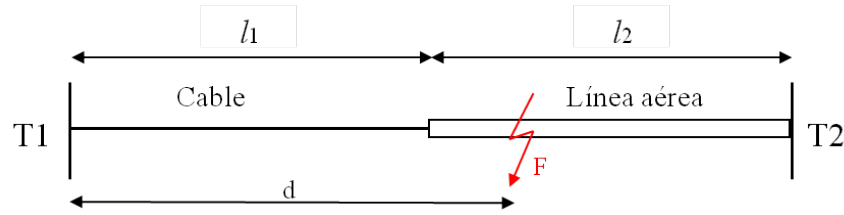


Figura 2.11: Falla en la sección de línea aérea de una línea híbrida de dos secciones.

$$d = l_1 + \frac{1}{2} \cdot \left(l_2 - \frac{v_2}{v_1} l_1 - (t_2 - t_1) \cdot v_2 \right) \quad (2.4)$$

Sistema híbrido de tres secciones

Este sistema presenta dos discontinuidades o juntas en toda su longitud. Al igual que en el sistema híbrido de dos secciones, el efecto de las juntas debe ser tenido en cuenta [2].

Una falla ocurrida en la primer sección de línea aérea, como la mostrada en la Figura 2.12, puede localizarse utilizando la siguiente ecuación [2]:

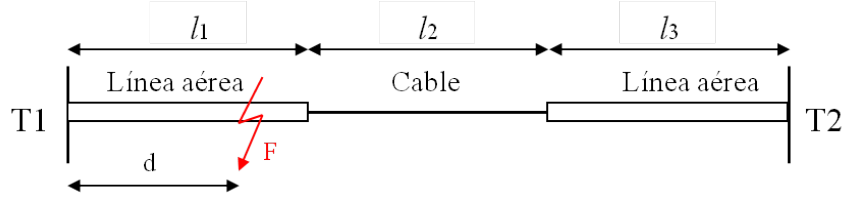


Figura 2.12: Falla en la primer sección de línea aérea de una línea híbrida de tres secciones.

$$d = \left(\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + \frac{l_3}{v_3} - (t_2 - t_1) \right) \cdot \frac{v_1}{2} \quad (2.5)$$

Donde l_1 y l_3 , son las longitudes de la primera sección y de la segunda sección de línea aérea, respectivamente; l_2 es la longitud de la sección de cable; v_1 y v_3 , son las velocidades de propagación de la onda sobre la primer sección y sobre la segunda sección de línea aérea, respectivamente; v_2 es la velocidad de propagación de la onda sobre la sección de cable.

Si la falla se encuentra en la sección de cable, tal y como se muestra en la Figura 2.13, es necesario usar la ecuación (2.6) para encontrar la distancia desde el terminal T1 hasta el punto de falla [2].

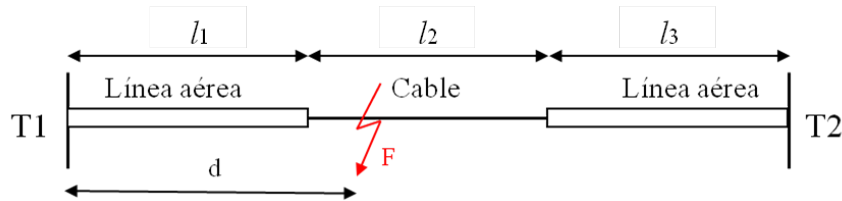


Figura 2.13: Falla en la sección de cable de una línea híbrida de tres secciones.

$$d = l_1 + \left(\frac{-l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + \frac{l_3}{v_3} - (t_2 - t_1) \right) \cdot \frac{v_2}{2} \quad (2.6)$$

Finalmente, la localización de una falla en la segunda sección de línea aérea, se obtiene mediante la ecuación (2.7).

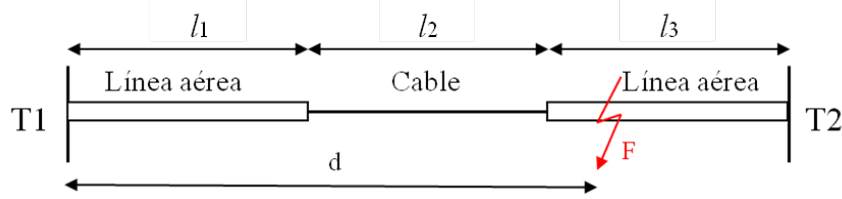


Figura 2.14: Falla en la segunda sección de línea aérea de una línea híbrida de tres secciones.

$$d = l_1 + l_2 + \left(\frac{-l_1}{v_1} - \frac{l_2}{v_2} + \frac{l_3}{v_3} - (t_2 - t_1) \right) \cdot \frac{v_3}{2} \quad (2.7)$$

Método de ondas viajeras con mediciones en un terminal

El método de las ondas viajeras también puede llevarse a cabo tomando mediciones en un solo terminal de la línea. Para esto, se requiere que la línea bajo falla esté desenergizada, y se hace uso de un equipo especial que genera un pulso electromagnético. Dicho pulso viaja a través de la línea hasta el punto donde se encuentra la falla, y regresa hasta el terminal de inicio. Midiendo el tiempo en que la onda realiza todo el recorrido y, conociendo la velocidad con la que esta se desplaza, es posible encontrar la distancia hasta la falla [4].

2.3.2. Método de inyección de pulso de tensión

Es un método iterativo, en el que se introduce y se mide un pulso de tensión en el terminal de alimentación y, se mide el transitorio de corriente que circula por la línea bajo falla. Estas mediciones de voltaje y corriente son usadas para calcular la impedancia de la línea dependiente de la frecuencia, tal y como se muestra en la ecuación (2.8) [5]:

$$Z_{med} = \frac{FFT(V)}{FFT(I)} \quad (2.8)$$

Donde $FFT(V)$ y $FFT(I)$, son la transformada de Fourier de la tensión y de la corriente, respectivamente. Z_{med} es la impedancia medida.

Siguiendo el modelo de línea pi, y teniendo en cuenta la resistencia de falla, se puede representar la línea bajo falla mediante la Figura 2.15, donde R' es la resistencia de la línea por kilómetro, L' es la inductancia de la línea por kilómetro, C' es la capacitancia de la línea por kilómetro, R_f es la resistencia de falla, y d es la distancia desde el terminal de alimentación T1 hasta el punto de falla.

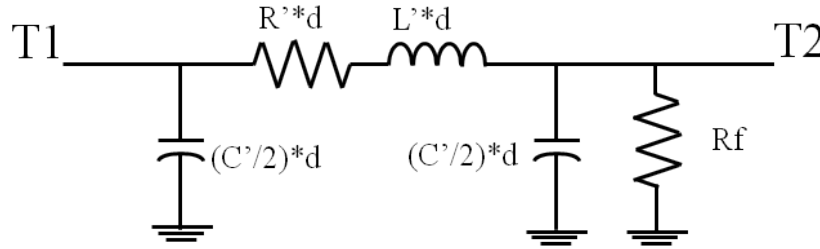


Figura 2.15: Modelo de línea pi con resistencia de falla.

El proceso de estimación de la distancia a la falla inicia analizando la parte real y la parte imaginaria de la impedancia medida. La parte imaginaria da un indicio sobre la distancia a la falla, mientras que la parte real indica la resistencia de falla y la resistencia de la porción de línea hasta la falla. Si la parte imaginaria de esta impedancia es positiva, se usa la ecuación (2.9) para encontrar la distancia a la falla, de lo contrario, se fija la distancia en un valor pequeño, por ejemplo, $d = 0,5$ km. Mediante la ecuación (2.10) se encuentra la resistencia de falla [5].

$$d = \frac{Im\{Z_{med}\}}{wL'} \quad (2.9)$$

$$R_f = Re\{Z_{med}\} - d \cdot R' \quad (2.10)$$

Donde $w = 2\pi f$, y f es la frecuencia de interés.

Estos valores iniciales de resistencia de falla y distancia a la falla se utilizan para obtener una impedancia calculada vista por el terminal T_1 . En [5] se propone la ecuación (2.11) para calcular dicha impedancia.

$$Z_{cal} = \frac{\left(\frac{-R_f \cdot \frac{wC'}{2}}{R_f - \frac{wC'}{2}} + jwL'd + R'd \right) \cdot \left(\frac{wC'd}{2} \right)}{\left(\frac{-R_f \cdot \frac{wC'}{2}}{R_f - \frac{wC'}{2}} + jwL'd + R'd \right) + \left(\frac{wC'd}{2} \right)} \quad (2.11)$$

Sin embargo, esta ecuación es errónea, ya que la impedancia debida a la capacitancia de la línea por kilómetro está planteada como:

$$Z'_C = \frac{-wC'}{2}$$

Además, en algunos términos de la ecuación hace falta multiplicar por la distancia.

Corrigiendo la impedancia debida a la capacitancia de la línea, y resolviendo los elementos en paralelo y en serie del circuito mostrado en la Figura 2.15, la impedancia calculada se obtiene correctamente mediante la ecuación (2.12)

$$Z_{cal} = \frac{\frac{-j2}{wC'd} \cdot \left((R' + jwL') \cdot d + \frac{\frac{-j2}{wC'd} \cdot R_f}{\frac{-j2}{wC'd} + R_f} \right)}{\frac{-j2}{wC'd} + (R' + jwL') \cdot d + \frac{\frac{-j2}{wC'd} \cdot R_f}{\frac{-j2}{wC'd} + R_f}} \quad (2.12)$$

Si la parte imaginaria de la impedancia calculada es igual a la de la impedancia medida, o cumple con un error admitido, entonces la distancia y la resistencia de falla calculadas reflejan los valores reales. Si existe una diferencia no aceptada entre las partes imaginarias de la impedancia calculada y la impedancia medida, entonces se debe actualizar el valor de d , tal y como se muestra en (2.13), y recalcular a R_f con la ecuación (2.10); con estos nuevos valores se obtiene una nueva impedancia calculada mediante (2.12) y se compara con la impedancia medida [5].

$$d = d + \frac{Im\{Z_{med}\} - Im\{Z_{cal}\}}{wL'} \quad (2.13)$$

El proceso se realiza hasta que haya una diferencia aceptable entre la impedancia medida y la impedancia calculada [5].

2.3.3. Método de distribución de voltaje

En este método, se adopta el modelo de línea de Bergeron, y se usa la distribución de voltaje a lo largo de la línea como herramienta principal para localizar la falla, partiendo de las mediciones realizadas después de que esta ocurre. Además, se utilizan las componentes modales del sistema (parámetros de modo 1 y parámetros de modo 0), con el fin de remover la influencia de las inductancias mutuas [6].

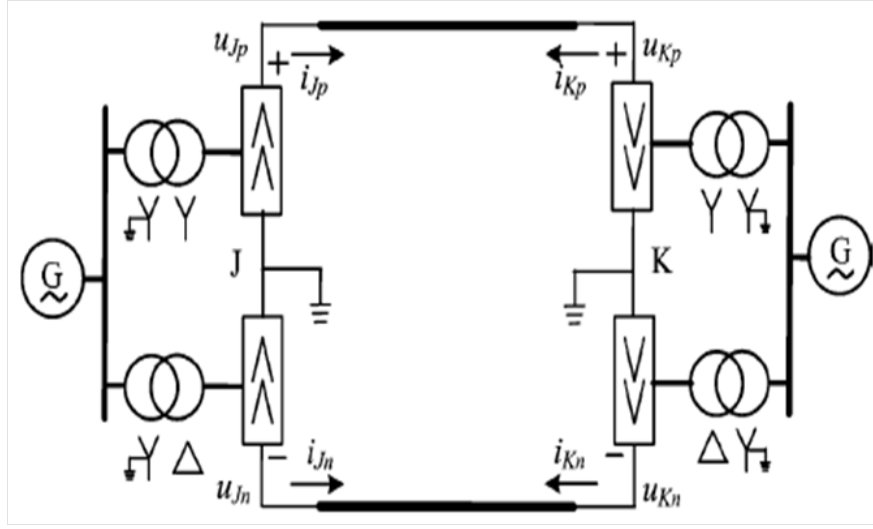


Figura 2.16: Sistema HVDC bipolar [6].

Para el sistema de la Figura 2.16, se muestran los voltajes modales y las corrientes modales para el terminal J, en el conjunto de ecuaciones (2.14), los voltajes y las corrientes modales para el terminal K, en (2.15), y los parámetros modales de la línea, en (2.16). Para más información, ver [6].

$$\begin{bmatrix} u_{J1} \\ u_{J0} \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_{Jp} \\ u_{Jn} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{J1} \\ i_{J0} \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{Jp} \\ i_{Jn} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} u_{K1} \\ u_{K0} \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_{Kp} \\ u_{Kn} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{K1} \\ i_{K0} \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{Kp} \\ i_{Kn} \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= R_s - R_m & R_0 &= R_s + R_m \\ L_1 &= L_s - L_m & L_0 &= L_s + L_m \\ G_1 &= G_g + 2G_m & G_0 &= G_g \\ C_1 &= C_g + 2C_m & C_0 &= C_g \end{aligned}, \quad (2.16)$$

Donde:

$$S = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

u_{Jp} y u_{Jn} , son los voltajes, positivo y negativo, respectivamente, en el terminal J ; i_{Jp} e i_{Jn} , son las corrientes, positiva y negativa, en el terminal J ; u_{Kp} y u_{Kn} , son los voltajes, positivo y negativo, en el terminal K ; i_{Kp} e i_{Kn} , son las corrientes, positiva y negativa, en el terminal K ; R_s y R_m , son la resistencia propia y la resistencia mutua de la línea, respectivamente; L_s y L_m , son la inductancia propia y la inductancia mutua de la línea; C_g y C_m , son la capacitancia polo-tierra y la capacitancia polo-polo de la línea; G_g y G_m , son la conductancia polo-tierra y la conductancia polo-polo de la línea [6].

Es posible, entonces, conocer la distribución de voltaje modal a lo largo de la línea de transmisión bajo falla.

Para calcular la distribución de voltaje utilizando las mediciones tomadas en el terminal J y las mediciones tomadas en el terminal K , en [6] se plantean las ecuaciones (2.17) y (2.18), respectivamente.

$$\begin{aligned} u_{iJ}(x, t) = & \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Z_{ci} + \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot \left[u_{Ji} \left(t + \frac{x}{v_i} \right) - i_{Ji} \left(t + \frac{x}{v_i} \right) \cdot \left(Z_{ci} + \frac{R'_i x}{4} \right) \right] \\ & + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Z_{ci} - \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot \left[u_{Ji} \left(t - \frac{x}{v_i} \right) + i_{Ji} \left(t - \frac{x}{v_i} \right) \cdot \left(Z_{ci} - \frac{R'_i x}{4} \right) \right] \\ & - \left(\frac{\frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot u_{Ji}(t) - \frac{R'_i x}{4} \cdot \left(\frac{Z_{ci} + \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right) \cdot \left(\frac{Z_{ci} - \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right) \cdot i_{Ji}(t) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
u_{iK}(x, t) = & \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Z_{ci} + \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot \left[u_{Ki} \left(t + \frac{x}{v_i} \right) - i_{Ki} \left(t + \frac{x}{v_i} \right) \cdot \left(Z_{ci} + \frac{R'_i x}{4} \right) \right] \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Z_{ci} - \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot \left[u_{Ki} \left(t - \frac{x}{v_i} \right) + i_{Ki} \left(t - \frac{x}{v_i} \right) \cdot \left(Z_{ci} - \frac{R'_i x}{4} \right) \right] \\
& - \left(\frac{\frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot u_{Ki}(t) - \frac{R'_i x}{4} \cdot \left(\frac{Z_{ci} + \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right) \cdot \left(\frac{Z_{ci} - \frac{R'_i x}{4}}{Z_{ci}} \right) \cdot i_{Ki}(t)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Sin embargo, la ecuación (2.18) es incorrecta, ya que para cada posición x medida desde el terminal J , la distancia hasta el terminal K es de $l - x$. En otras palabras, la ecuación (2.18) debe estar en función de $l - x$, en vez de x . Esta corrección se muestra en la ecuación (2.19), siendo esta la ecuación corregida para calcular la distribución de voltaje a lo largo de la línea mediante las mediciones en el terminal K .

$$\begin{aligned}
u_{iK}(l - x, t) = & \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Z_{ci} + \frac{R'_i y}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot \left[u_{Ki} \left(t + \frac{y}{v_i} \right) - i_{Ki} \left(t + \frac{y}{v_i} \right) \cdot \left(Z_{ci} + \frac{R'_i y}{4} \right) \right] \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Z_{ci} - \frac{R'_i y}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot \left[u_{Ki} \left(t - \frac{y}{v_i} \right) + i_{Ki} \left(t - \frac{y}{v_i} \right) \cdot \left(Z_{ci} - \frac{R'_i y}{4} \right) \right] \\
& - \left(\frac{\frac{R'_i y}{4}}{Z_{ci}} \right)^2 \cdot u_{Ki}(t) - \frac{R'_i y}{4} \cdot \left(\frac{Z_{ci} + \frac{R'_i y}{4}}{Z_{ci}} \right) \cdot \left(\frac{Z_{ci} - \frac{R'_i y}{4}}{Z_{ci}} \right) \cdot i_{Ki}(t)
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Donde:

$$y = l - x \quad , \quad Z_{ci} = \sqrt{\frac{L'_i}{C'_i}}$$

El subíndice i indica el modo (1 ó 0); R'_i , L'_i y C'_i , son la resistencia de la línea por kilómetro, la inductancia de la línea por kilómetro y la capacitancia de la línea por kilómetro, respectivamente, para el modo i ; Z_{ci} es la impedancia característica de la línea para el modo i ; v_i es la velocidad de la onda sobre la línea para el modo i ; x es la distancia desde un punto x sobre la línea hasta el terminal J ; l es la longitud total de la línea; $u_{Ji}(t)$ y $u_{Ki}(t)$, son los voltajes del modo i para el tiempo t , en el terminal J y en el terminal K , respectivamente; $i_{Ji}(t)$ e $i_{Ki}(t)$, son las corrientes del modo i para el tiempo t , en el terminal J y en el terminal K , respectivamente; $u_{iJ}(x, t)$ es el voltaje del modo i para el tiempo t , en el punto x , y es obtenido usando mediciones de corriente y voltaje en el terminal J ; $u_{iK}(l - x, t)$ es el voltaje del modo i para el tiempo t , en el punto x , y es obtenido usando mediciones de corriente y voltaje en el terminal K .

Conociendo la distribución de voltaje a lo largo de la línea, es posible localizar el punto de falla, usando la función criterio que se muestra en (2.20), donde t_1 y t_2 son los límites de tiempo de la ventana de datos. Esta función toma su valor mínimo cuando x es igual a la distancia d desde el terminal J hasta la falla [6].

$$f(x) = \sum_{t=t_1}^{t_2} |u_{iJ}(x, t) - u_{iK}(l - x, t)| \quad , \quad x \in [0, l] \quad (2.20)$$

Por lo tanto, se tiene:

$$f(d) = \min \{f(x)\} \quad (2.21)$$

Capítulo 3

Método propuesto

El método desarrollado en este trabajo utiliza mediciones de tensión y de corriente en los dos extremos de la línea. Al igual que el método de inyección de pulso de tensión, hace uso de la transformada de Fourier como herramienta para efectuar el análisis circuital. El modelo de línea pi es adoptado en este método.

Para ejecutar el método, se selecciona como ventana de datos las mediciones tomadas en el tiempo de duración de la falla. Esta ventana de datos puede ser reducida, con el fin de obtener mayor precisión. Esto es, analizar una ventana de datos que posea entre el 60 % y el 80 % de los datos tomados en el tiempo de duración de la falla. La Figura 3.1 ilustra la selección de la ventana de datos sobre una gráfica de corriente; las líneas punteadas delimitan los datos tomados durante la falla, y las líneas continuas delimitan la ventana de datos seleccionada.

A estas mediciones se les aplica la Transformada Rápida de Fourier, mediante la cual, se obtienen sus componentes de frecuencia. Las componentes de frecuencia de interés en este método, son las de 0 Hz, ya que a esta frecuencia no existe el efecto de la inductancia y de la capacitancia de la línea. Por lo anterior, es posible tener en cuenta solo el efecto de la

resistencia de la línea, lo que permite plantear un sistema de ecuaciones simple para encontrar la distancia a la falla.

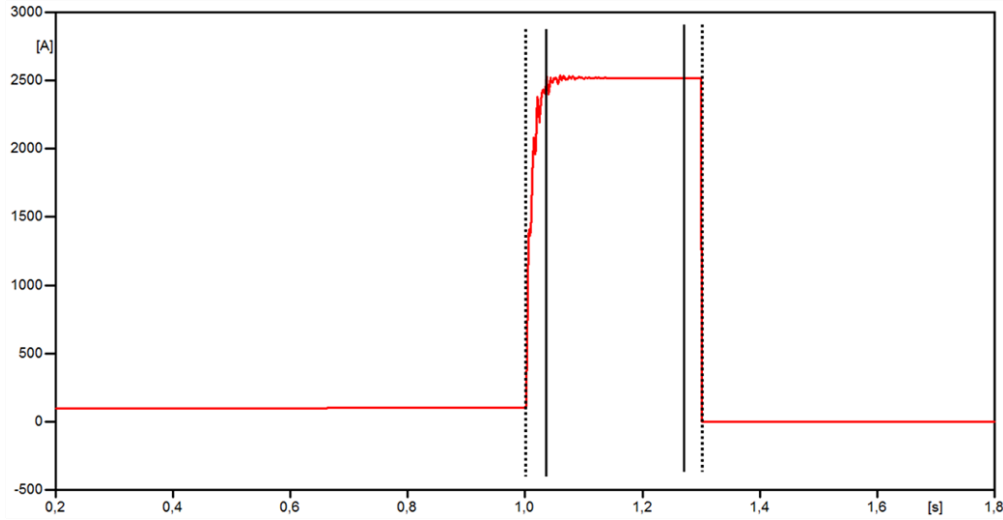


Figura 3.1: Selección de la ventana de datos.

3.1. Sistema monopolar

En la Figura 3.2, se muestra una falla polo-tierra en una línea monopolar. A las mediciones tomadas en los terminales T_1 y T_2 durante la falla, se les efectúa la transformada de Fourier para obtener la componente de 0 Hz de cada una de ellas. Después de esto, es posible representar el sistema mediante el circuito mostrado en la Figura 3.3.

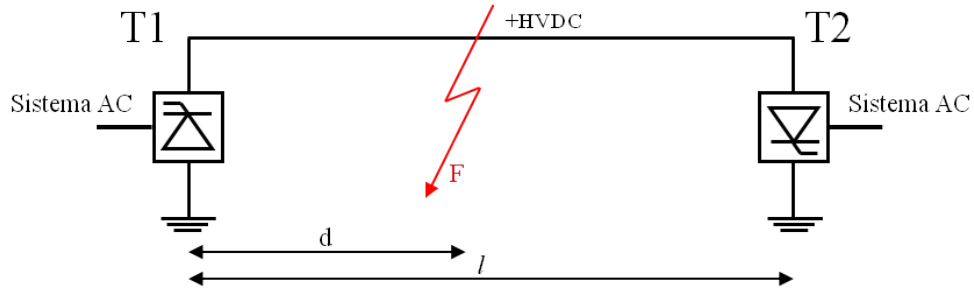


Figura 3.2: Falla polo-tierra en una línea HVDC monopolar.

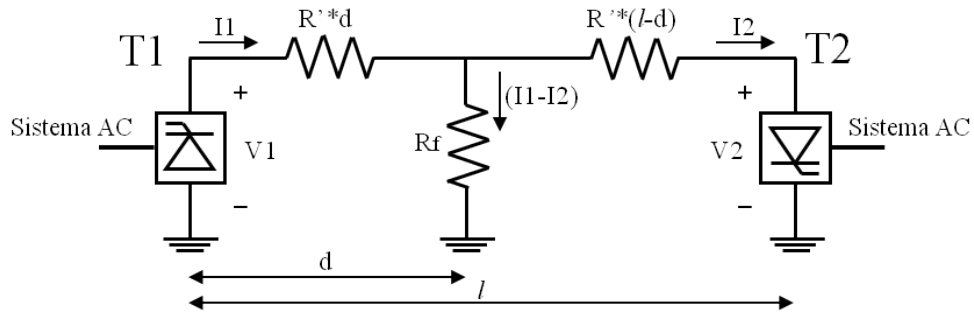


Figura 3.3: Circuito equivalente de la falla mostrada en la Figura 3.2.

Donde V_1 e I_1 , son las componentes de 0 Hz de la tensión y de la corriente, respectivamente, medidas en el terminal T_1 en la ventana de datos seleccionada; V_2 e I_2 , son las componentes de 0 Hz de la tensión y de la corriente, respectivamente, medidas en el terminal T_2 en la ventana de datos seleccionada; l es la longitud total de la línea; R' es la resistencia de la línea por kilómetro; d es la distancia desde el terminal T_1 hasta la falla; R_f es la resistencia de falla.

Luego, es posible plantear la ley de los voltajes de Kirchhoff en la malla exterior del circuito mostrado en la Figura 3.3, de la siguiente manera:

$$V_1 = I_1 R' d + I_2 R' \cdot (l - d) + V_2$$

Y despejando para d :

$$\begin{aligned} d \cdot R' \cdot (I_1 - I_2) &= V_1 - V_2 - I_2 R' l \\ d &= \frac{V_1 - V_2 - I_2 R' l}{R' \cdot (I_1 - I_2)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Como se puede observar, en la ecuación (3.1) se obtiene la distancia desde el terminal T_1 hasta la falla. Finalmente, si se desea calcular el valor de la resistencia de falla, se plantea la suma de voltajes en cualquiera de las dos mallas interiores en función del valor ya conocido de d , por ejemplo, en la malla del terminal T_1 , así:

$$V_1 = I_1 R' d + R_f \cdot (I_1 - I_2)$$

Y despejando para R_f :

$$\begin{aligned} R_f \cdot (I_1 - I_2) &= V_1 - I_1 R' d \\ R_f &= \frac{V_1 - I_1 R' d}{I_1 - I_2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2. Sistema bipolar

3.2.1. Falla polo-tierra

Las fallas polo-tierra para el sistema bipolar pueden ser localizadas de la misma manera que para el sistema monopolar, sin embargo, se debe tener en cuenta el efecto de la resistencia mutua entre los dos conductores. La Figura 3.4 representa un sistema bipolar con una falla polo-tierra en el polo positivo.

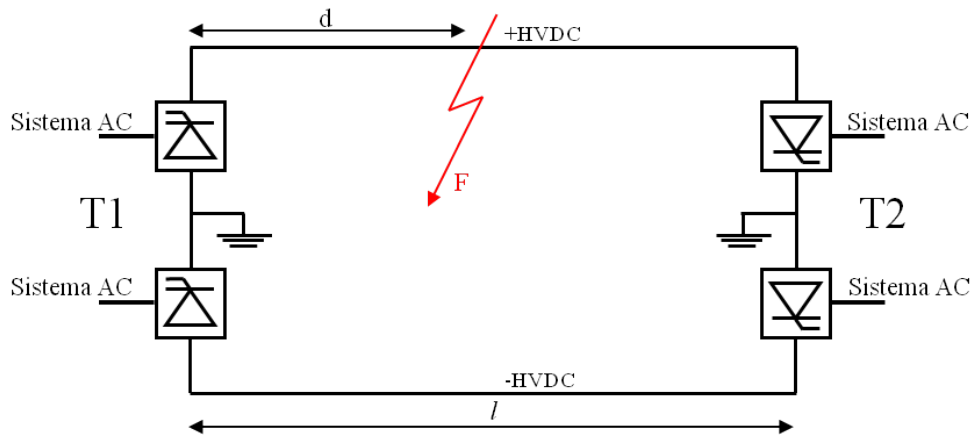


Figura 3.4: Falla polo-tierra en una línea HVDC bipolar.

Para este escenario, es fácilmente identificable el tipo de falla, ya que la corriente en el terminal T_1 , en el polo fallado (polo positivo para el caso de la Figura 3.4), sufre un aumento drástico, mientras que la corriente en el otro polo no varía considerablemente. Esta idea se ilustra en la Figura 3.5, donde se muestran las corrientes en el terminal T1 de un sistema bipolar con una falla polo-tierra en el polo positivo; la gráfica roja representa la corriente de polo positivo, y la gráfica verde, la corriente de polo negativo.

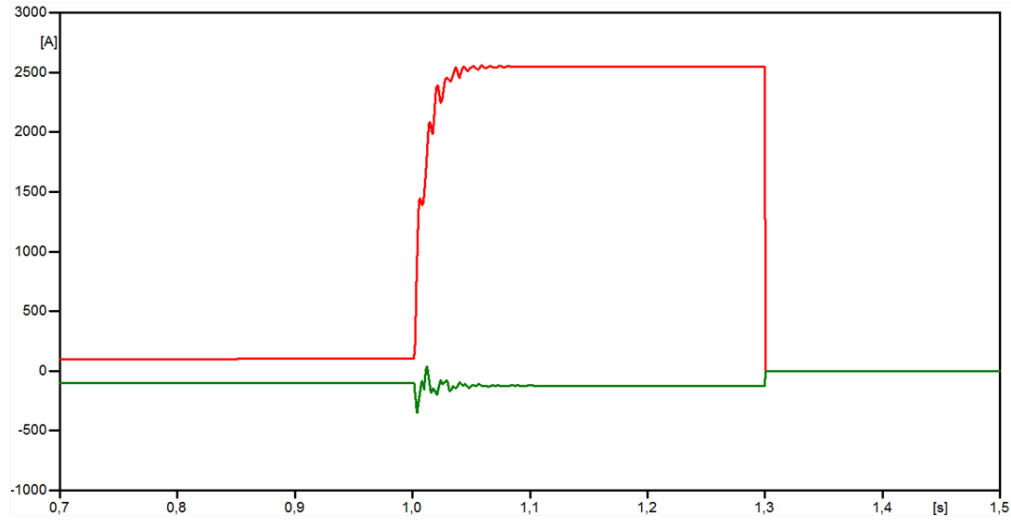


Figura 3.5: Corrientes en el terminal T_1 de un sistema bipolar bajo una falla polo-tierra.

Después de seleccionar la ventana de datos y aplicar la transformada de Fourier a las mediciones de tensión y de corriente en los dos extremos de la línea, es posible representar el sistema bajo falla mediante el circuito mostrado en la Figura 3.6.

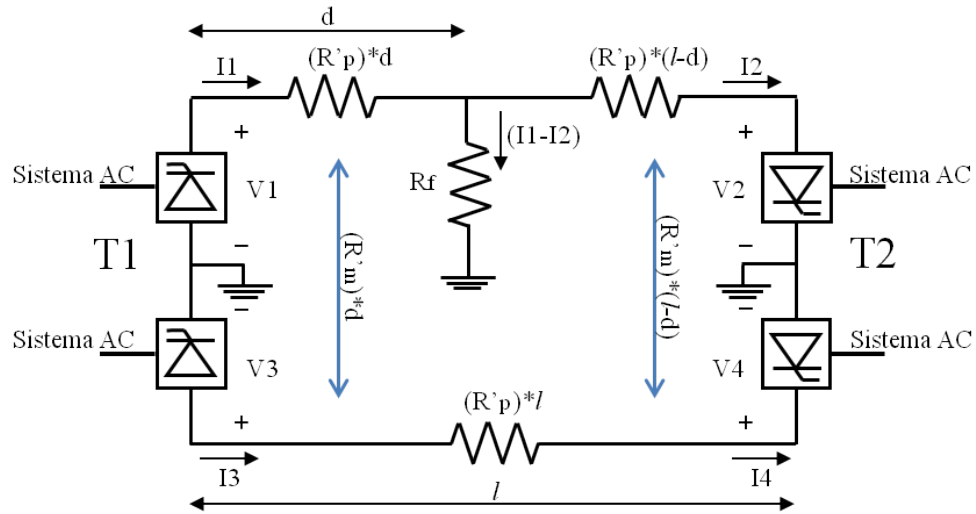


Figura 3.6: Circuito equivalente de la falla mostrada en la Figura 3.4.

Donde V_1 e I_1 , son las componentes de 0 Hz de la tensión y de la corriente, respectivamente, medidas en el polo positivo del terminal T_1 en la ventana de datos seleccionada; V_3 e I_3 , son las componentes de 0 Hz de la tensión y de la corriente, respectivamente, medidas en el polo negativo del terminal T_1 en la ventana de datos seleccionada; V_2 e I_2 , son las componentes de 0 Hz de la tensión y de la corriente, respectivamente, medidas en el polo positivo del terminal T_2 en la ventana de datos seleccionada; V_4 e I_4 , son las componentes de 0 Hz de la tensión y de la corriente, respectivamente, medidas en el polo negativo del terminal T_2 en la ventana de datos seleccionada; l es la longitud total de la línea; R'_p es la resistencia propia de la línea por kilómetro; R'_m es la resistencia mutua de la línea por kilómetro; d es la distancia desde el terminal T_1 hasta la falla; R_f es la resistencia de falla.

La resistencia mutua (R'_m) representa la existencia de un potencial inducido entre dos elementos. En los sistemas HVDC, las corrientes de retorno incrementan el potencial en los conductores. La corriente de retorno debida a un conductor induce una tensión adicional en el otro conductor, y la resistencia mutua es la razón entre la tensión inducida y la corriente de retorno [7].

En este punto, se plantea la ley de los voltajes de Kirchhoff en la malla exterior del sistema, asumiendo las tensiones y las corrientes como se muestra en la Figura 3.6. A diferencia de la ecuación en el sistema monopolar, la planteada aquí es una ecuación matricial.

$$V_{T1} = R' \cdot d \cdot I_{T1} + R' \cdot (l - d) \cdot I_{T2} + V_{T2} \quad (3.3)$$

Donde:

$$V_{T1} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix}, \quad V_{T2} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_4 \end{bmatrix}, \quad I_{T1} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix}, \quad I_{T2} = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \end{bmatrix},$$

$$R' = \begin{bmatrix} R'_p & R'_m \\ R'_m & R'_p \end{bmatrix}$$

A partir de esta ecuación matricial, se puede extraer la ecuación algebraica relacionada al polo positivo (polo bajo falla) que se muestra a continuación:

$$V_1 = R'_p d I_1 + R'_m d I_3 + R'_p \cdot (l - d) I_2 + R'_m \cdot (l - d) I_4 + V_2$$

Y despejando para d :

$$\begin{aligned} V_1 &= d \cdot (R'_p I_1 + R'_m I_3 - R'_p I_2 - R'_m I_4) + l \cdot (R'_p I_2 + R'_m I_4) + V_2 \\ d &= \frac{V_1 - V_2 - l \cdot (R'_p I_2 + R'_m I_4)}{R'_p \cdot (I_1 - I_2) + R'_m \cdot (I_3 - I_4)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Por medio de la ecuación (3.4) se conoce la ubicación de la falla respecto al terminal de alimentación T_1 .

Adicionalmente, si se desea calcular el valor de la resistencia de falla, se debe hallar la tensión en el punto de falla, así:

$$\begin{bmatrix} V_{fp} \\ V_{fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R'_p & R'_m \\ R'_m & R'_p \end{bmatrix} \cdot d \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

Donde V_{fp} y V_{fn} , son las tensiones de polo positivo y de polo negativo, respectivamente, en el punto de falla.

Siendo V_{fp} la tensión sobre la resistencia de falla, se utiliza la ecuación (3.5) para hallar esta resistencia.

$$R_f = \frac{V_{fp}}{I_1 - I_2} \quad (3.5)$$

3.2.2. Falla polo-polo y falla polo-polo-tierra

La diferencia entre la falla polo-polo y la falla polo-polo-tierra, es que en la primera se involucran los dos polos del sistema, mientras que en la segunda, además de los dos polos, se involucra la tierra. La ocurrencia de cualquiera de estos dos tipos de falla se detecta debido al gran incremento en las dos corrientes en el terminal de alimentación T_1 , tal y como se observa en la Figura 3.7, donde la curva roja representa la corriente de polo positivo, y la verde, la corriente de polo negativo. Sin embargo, es difícil diferenciar entre estos dos tipos de falla observando sólo las mediciones en los extremos de la línea.

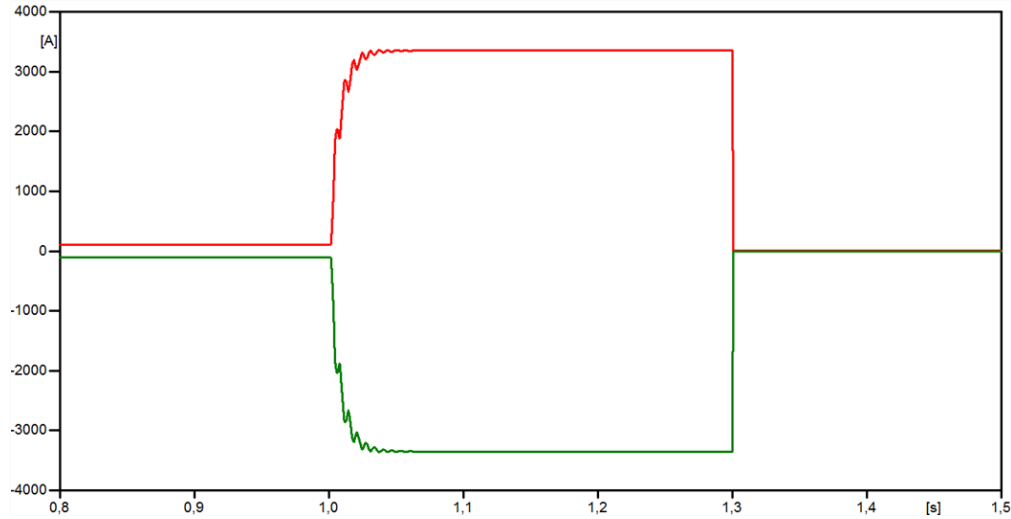


Figura 3.7: Corrientes en el terminal T_1 de un sistema bipolar bajo una falla que involucra los dos polos.

A pesar de la dificultad para diferenciar entre estos dos tipos de falla, el método propuesto puede ser ejecutado sin inconvenientes para encontrar la ubicación de la falla, aunque no la resistencia o las resistencias de falla.

El procedimiento de localización de la falla es exactamente igual que para la falla polo-tierra. Se selecciona la ventana de datos, y sobre esta se aplica la transformada de Fourier para obtener las componentes de 0 Hz de las mediciones de tensión y de corriente durante la falla. Después de esto, las fallas que involucran los dos polos del sistema pueden ser representadas circuitualmente como se muestra en la Figura 3.8 y en la Figura 3.9.

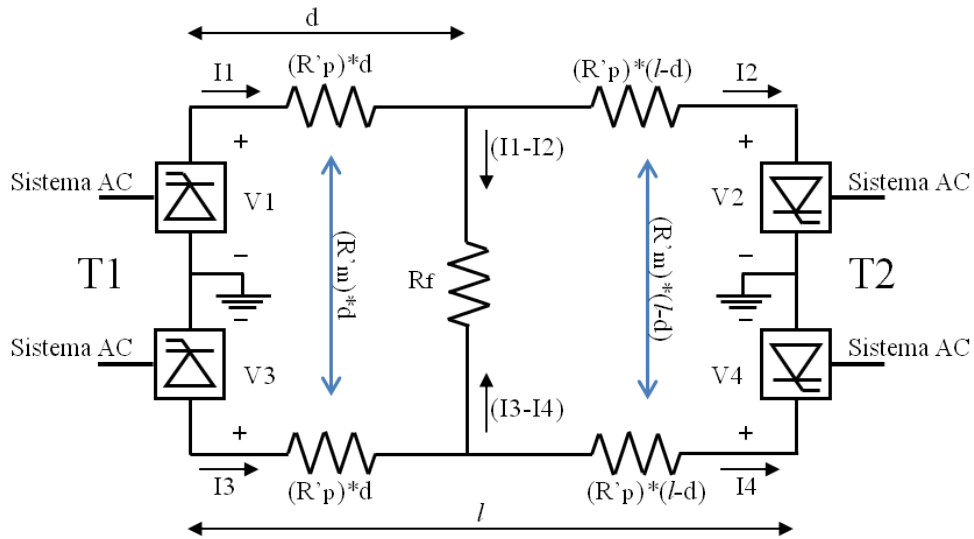


Figura 3.8: Circuito equivalente de una falla polo-polo.

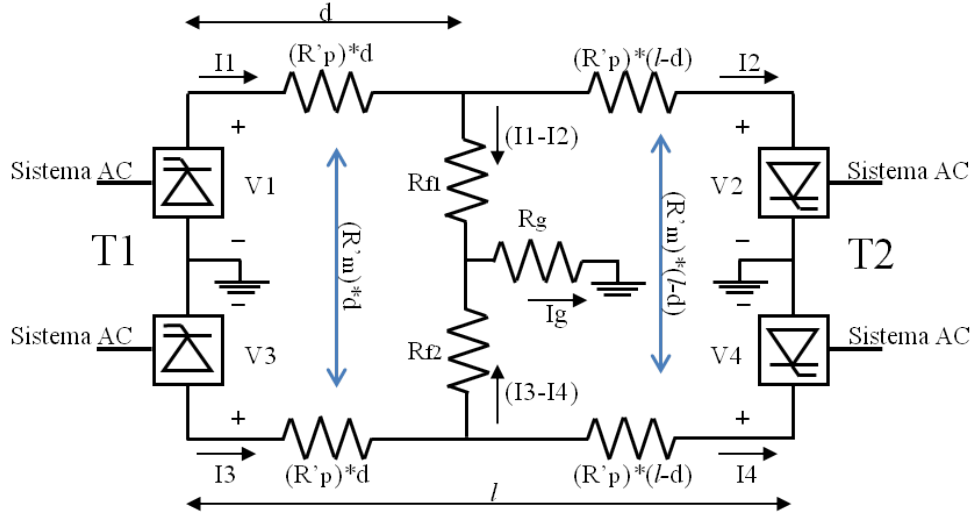


Figura 3.9: Circuito equivalente de una falla polo-polo-tierra.

Sin importar el tipo de falla ocurrida, para ambos circuitos es posible plantear la misma ecuación matricial planteada para la falla polo-tierra en (3.3):

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_p & R'_m \\ R'_m & R'_p \end{bmatrix} \cdot d \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R'_p & R'_m \\ R'_m & R'_p \end{bmatrix} \cdot (l-d) \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_2 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Así las cosas, la distancia a la falla, medida desde el terminal T_1 , se obtiene usando la ecuación (3.4), que relaciona a la distancia con las tensiones de polo positivo del sistema:

$$d = \frac{V_1 - V_2 - l \cdot (R'_p I_2 + R'_m I_4)}{R'_p \cdot (I_1 - I_2) + R'_m \cdot (I_3 - I_4)}$$

O bien, se puede extraer de la ecuación matricial, la ecuación algebraica que relaciona a la distancia con las tensiones de polo negativo del sistema, como sigue:

$$V_3 = R'_m d I_1 + R'_p d I_3 + R'_m \cdot (l - d) I_2 + R'_p \cdot (l - d) I_4 + V_4$$

Y despejando para d :

$$\begin{aligned} V_3 &= d \cdot (R'_m I_1 + R'_p I_3 - R'_m I_2 - R'_p I_4) + l \cdot (R'_m I_2 + R'_p I_4) + V_4 \\ d &= \frac{V_3 - V_4 - l \cdot (R'_m I_2 + R'_p I_4)}{R'_m \cdot (I_1 - I_2) + R'_p \cdot (I_3 - I_4)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Por lo tanto, puede usarse la ecuación (3.3) o la ecuación (3.6) para encontrar la distancia desde el terminal T_1 hasta el punto de falla, cuando esta involucre a los dos polos del sistema, sin necesidad de identificar el tipo de falla (polo-polo o polo-polo-tierra). No obstante, no se plantea una forma de encontrar la resistencia o las resistencias de falla, debido a que no es fundamental conocer estos valores para localizar la falla por medio de este método, además de la dificultad para diferenciar entre estos dos tipos de falla.

Capítulo 4

Pruebas y análisis de resultados

Como se mencionó anteriormente, los métodos basados en ondas viajeras son los más utilizados para localizar fallas en líneas de transmisión en DC. La dificultad para adaptar a los sistemas DC los métodos basados en la impedancia de la línea usados en sistemas AC, implica que haya pocos métodos desarrollados de este tipo en sistemas DC.

El propósito de este trabajo es realizar un aporte a la localización de fallas mediante métodos basados en la impedancia de la línea, ya que estos se caracterizan por tener un bajo costo y fácil implementación. Por esta razón, en este capítulo se ponen a prueba dos métodos de este tipo, el método de inyección de pulso de tensión y el método de distribución de voltaje, con el fin de compararlos con el método propuesto en este trabajo, que también es llevado a prueba.

4.1. Sistema de prueba

Para implementar los métodos analizados y el método propuesto, se utilizó un sistema HVDC bipolar con retorno por tierra, como el mostrado en la Figura 2.3, con una tensión nominal de ± 500 kV y una longitud total de la línea de 1000 km. En la Figura 4.1, se muestra la disposición de los conductores sobre la torre. El tipo de conductor es *Chukar*, y posee una resistencia de $0.0318 \Omega/\text{km}$ y un diámetro externo de 40.691 mm. La resistividad del terreno es de $100 \Omega\cdot\text{m}$. Este sistema fue tomado de [6].

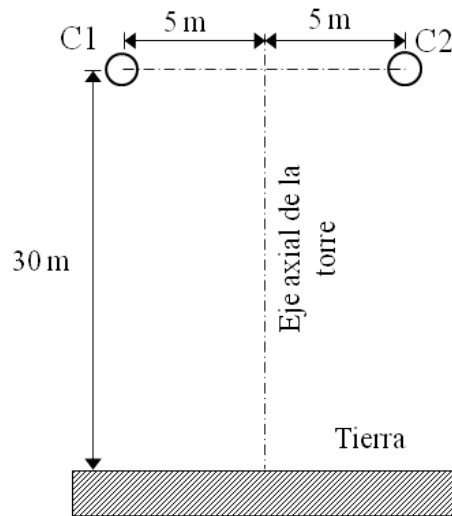


Figura 4.1: Disposición de los conductores sobre la torre.

Sobre esta línea se generaron fallas de tipo polo-tierra, a 100, 500 y 900 km del terminal de alimentación, y con resistencias de falla de 0, 50 y 100Ω . El software utilizado para simular el sistema descrito y los escenarios de falla, es ATPDraw. Los datos obtenidos aquí se guardan en un archivo de Excel, para luego ser llevados a MatLab, donde se ejecutan los códigos de los métodos.

4.2. Implementación de los métodos analizados

4.2.1. Método de inyección de pulso de tensión

Se verificó este método haciendo uso de un pulso de tensión idéntico al usado en [5], tal y como se muestra en la Figura 4.2. En la misma figura, se muestra además, a manera de ejemplo, el transitorio de corriente que se genera por dicho pulso aplicado sobre la línea, mientras esta sufre una falla a 100 km con una resistencia de 100Ω . También se aprecian los espectros de frecuencias, tanto del pulso de tensión, como del transitorio de corriente.

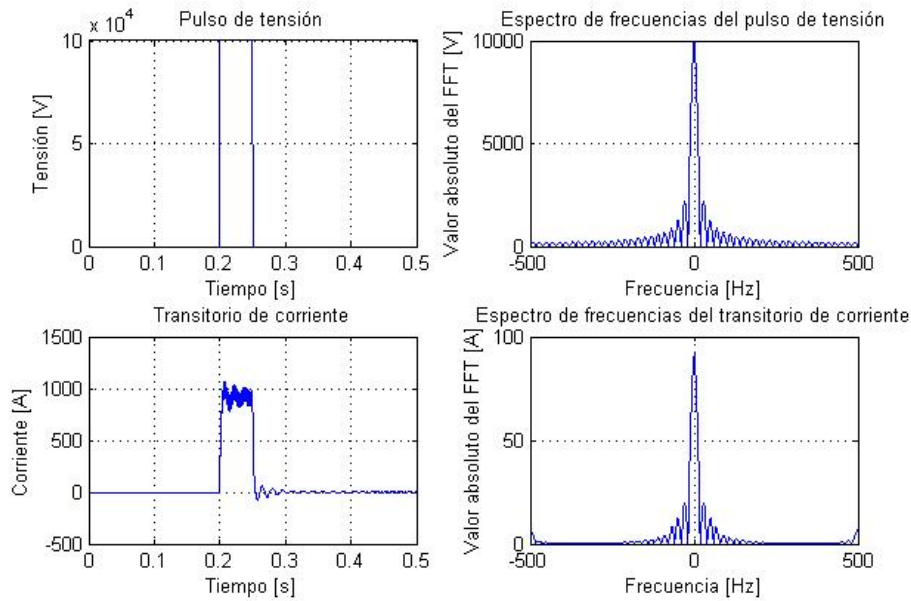


Figura 4.2: Pulso de tensión y transitorio de corriente.

Este método no especifica una forma de escoger una frecuencia a la cual ejecutarlo, por lo que se elige al azar una de las componentes de frecuencia del pulso de tensión y el transitorio de corriente. Para las fallas ocurridas a los 100 km, se escogió las componentes de frecuencia de 150 Hz, y para el resto de las fallas, las componentes de 28 Hz.

En la Figura 6.1 en el capítulo de Anexos, se muestra el diagrama de flujo del procedimiento seguido en la implementación de este método.

4.2.2. Método de distribución de voltaje

En la implementación de este método, se hizo uso de los parámetros de modo 1 del modelo de línea de Bergeron. Se tomó una ventana de datos de 0.2 ms, que empieza a 0.1488 s después de iniciada la falla, con un periodo de muestreo de 1 μ s. El cálculo de voltaje para cada posición x sobre la línea, se hizo cada 1 km, partiendo en el terminal de alimentación J (0 km) y finalizando en el terminal K (1000 km). En la Figura 4.3 se muestra la corriente de polo positivo en el terminal J cuando ocurre una falla a 100 km con una resistencia de 50 Ω . En esta se puede observar que para la ventana de datos escogida (entre 0.1488 s y 0.149 s), la corriente se encuentra estable, o su valor no varía en gran medida.

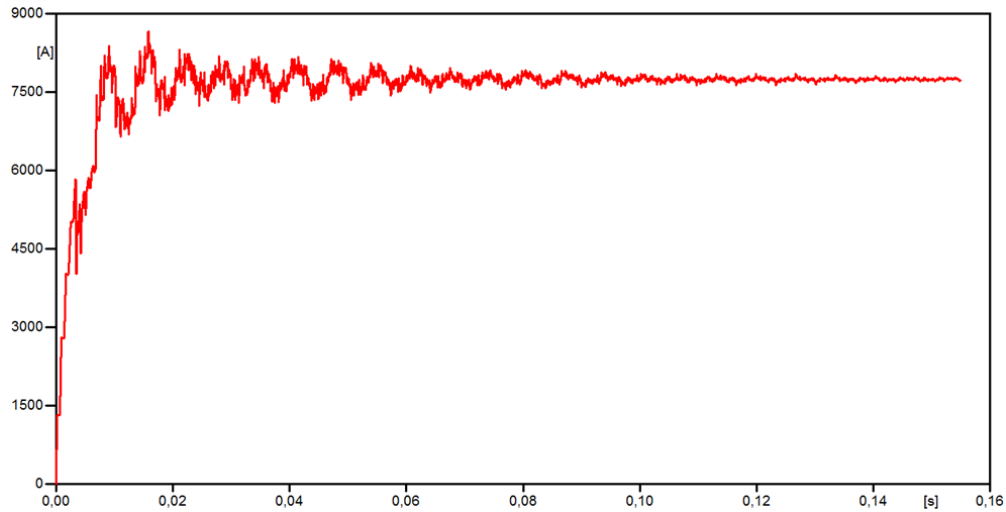


Figura 4.3: Ejemplo de corriente de cortocircuito.

El procedimiento seguido para implementar este método se muestra en la Figura 6.2 en el capítulo de Anexos.

4.2.3. Método propuesto

Las pruebas a este método sobre el sistema de prueba descrito en 4.1, se realizaron por medio de fallas de 0.3 s de duración. La ventana de datos seleccionada fue el 70 % de las mediciones tomadas durante la falla, recortando 20 % de los datos a la izquierda y 10 % a la derecha, tal y como se muestra en el ejemplo de la Figura 4.4, que muestra la corriente de polo positivo en el terminal T_1 cuando ocurre una falla a 900 km del mismo, con una resistencia de 50Ω .

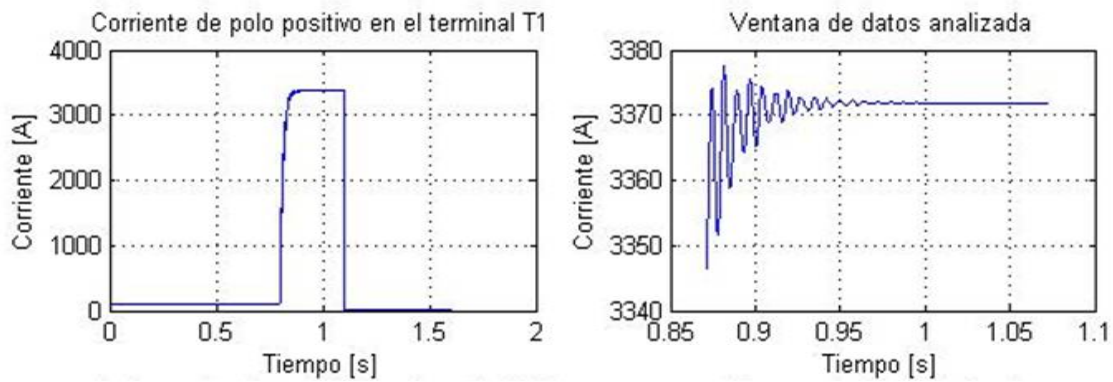


Figura 4.4: Ejemplo de selección de ventana de datos.

En la Figura 6.3 en el capítulo de Anexos, se muestra el procedimiento seguido para implementar este método.

4.3. Resultados y análisis

A continuación se muestran los resultados obtenidos por las pruebas. Los dos métodos analizados y el método propuesto se ejecutaron bajo las condiciones especificadas en 4.2. Sin embargo, con el fin de corroborar su precisión, se modificaron algunas condiciones, tal y como se observará más adelante en esta sección.

Para calcular el error en distancia obtenido en cada una de las pruebas, se implementó la ecuación (4.1).

$$\text{Error en distancia} = \frac{\text{Distancia estimada} - \text{Distancia real}}{\text{Distancia real}} \cdot 100 \% \quad (4.1)$$

4.3.1. Método de inyección de pulso de tensión

Primeramente, se realizaron pruebas a este método utilizando la ecuación original (ecuación (2.11)) propuesta en [5], para verificar que esta impide el correcto funcionamiento del método. Debido a que usando esta ecuación nunca se cumple un error admitido cercano a cero entre la impedancia calculada y la impedancia medida, se omitió la condición de dicho error, y se implementó un número fijo de iteraciones (200 iteraciones). Los resultados se muestran en la Tabla 4.1.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Resistencia estimada [Ω]	Error en distancia [%]
100	50	23083.89144	-2021.657691	22983.891438
500	50	102856.399709	-9185,357214	20471.279942
900	50	202343.763508	-18093.185451	22382.640390

Tabla 4.1: Resultados de las pruebas usando la ecuación (2.11).

En la anterior tabla se observa el mal funcionamiento del método cuando se ejecuta haciendo uso de la ecuación (2.11), puesto que esta no describe correctamente la impedancia vista desde el terminal T_1 . Los errores obtenidos son valores extremadamente grandes y las distancias estimadas superan notablemente la longitud total de la línea.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a este método, usando la ecuación (2.12) (ecuación corregida), se muestran a continuación.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Resistencia estimada [Ω]	Error en distancia [%]
100	0	107.740392	1.107093	7.740392
	50	106.913906	53.996755	6.913906
	100	103.688967	96.783524	3.688967
500	0	495.295627	5.523426	-0.9408746
	50	494.576394	61.628095	-1.0847212
	100	487.481041	116.746722	-2.5037918
900	0	873.372249	32.830547	-2.958639
	50	902.645104	104.253811	0.293900444
	100	951.562531	170.476067	5.729170111

Tabla 4.2: Resultados del método de inyección de pulso de tensión.

Como se observa en la tabla, en las pruebas realizadas se presenta un error máximo de 7.740392 %, cuando la falla se encuentra a 100 km del terminal de alimentación con una resistencia de 0 Ω .

Además de estas pruebas, se realizó una adicional para una falla ocurrida a 100 km del terminal de alimentación, con una resistencia de 100 Ω , pero ejecutando el método a la componente de frecuencia de 50 Hz. En la Tabla 4.3 se muestra el resultado obtenido para esta prueba.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Resistencia estimada [Ω]	Error en distancia [%]
100	100	57.485603	89.725306	-42.514397

Tabla 4.3: Resultado de la prueba a 50 Hz.

En la anterior tabla, se puede observar el gran incremento en el porcentaje de error que tuvo el método al cambiar la frecuencia de interés. Esto indica que la principal falencia del método es la aleatoriedad en la escogencia de la componente de frecuencia del pulso de tensión, ya que los resultados no tienen la misma certeza en cada una de estas componentes. En otras palabras, la exactitud de este método depende de la componente de frecuencia a la cual se ejecute, permitiendo la posibilidad de obtener errores considerables en la estimación de la distancia a la falla.

4.3.2. Método de distribución de voltaje

Al realizar pruebas usando la ecuación propuesta en [6] (ecuación (2.18)), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.4.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Error en distancia [%]
100	50	0	-100
500	50	731	46.2
900	50	9	-99

Tabla 4.4: Resultados de las pruebas usando la ecuación (2.18).

Mediante estas pruebas, se verificó que aunque las distancias estimadas están entre 0 y 1000 km, no representan una buena estimación. Los errores presentes en estas pruebas son considerables, debido al uso de la ecuación de distribución de voltaje en (2.18) en función de x .

Luego, se implementó el método usando la ecuación corregida (ecuación (2.19)), obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.5. En la Figura 4.5 se visualiza la curva criterio $F(x)$ utilizada en ese método, obtenida para una falla ubicada a 100 km del terminal de alimentación, con una resistencia de 50 Ω .

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Error en distancia [%]
100	0	95	-5
	50	106	6
	100	108	8
500	0	508	1.6
	50	489	-2.2
	100	479	-4.2
900	0	901	0.111111
	50	894	-0.666667
	100	890	-1.111111

Tabla 4.5: Resultados del método de distribución de voltaje.

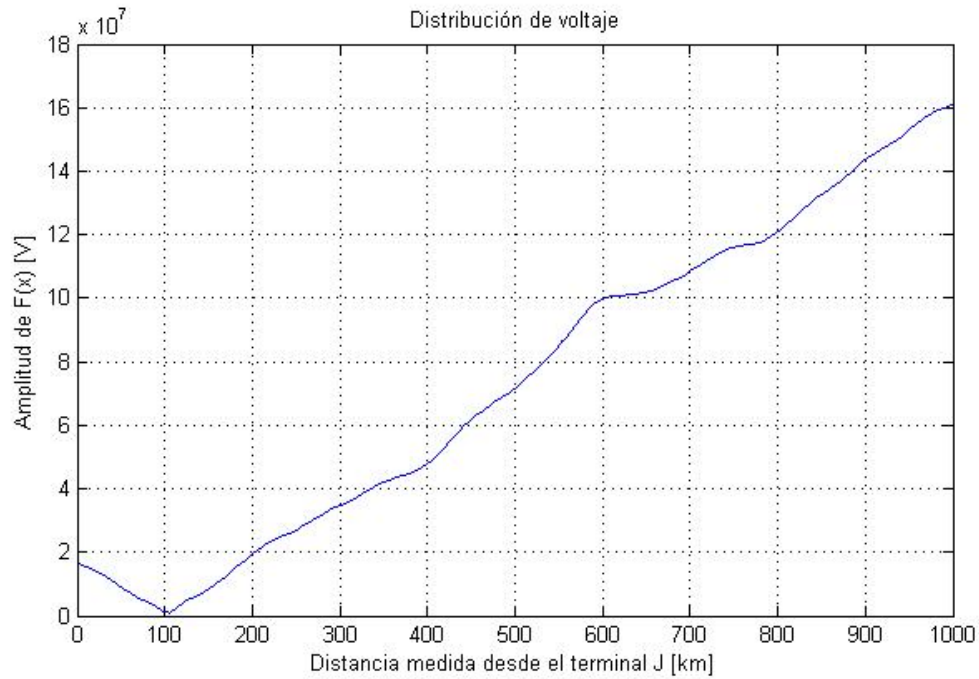


Figura 4.5: Curva de distribución de voltaje para una falla a 100 km con resistencia de falla de 50 Ω .

El error máximo obtenido en estas pruebas es de 8 %, y ocurre para la falla ubicada a 100 km, con resistencia de 100 Ω .

Una prueba adicional se realizó modificando la ventana de datos. Esta tuvo la misma duración de 0.2 ms, pero su inicio fue en 0.1 s. Como se observa en la Figura 4.3, en los instantes de tiempo cercanos a 0.1 s, la corriente de polo positivo en el terminal J posee una gran variación. La Tabla 4.6 y la Figura 4.6 muestran los resultados de esta prueba.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Error en distancia [%]
100	50	55	-45

Tabla 4.6: Resultado de la prueba para una ventana de datos de 0.2 ms, iniciada en 0.1 s.

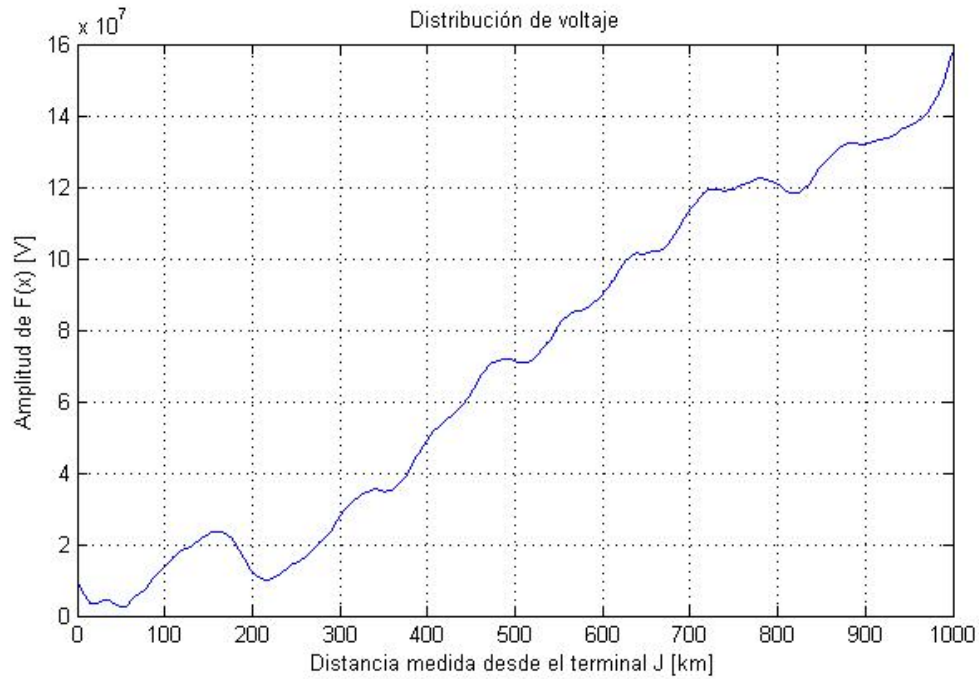


Figura 4.6: Curva de distribución de voltaje para una falla a 100 km con resistencia de falla de 50Ω , para la ventana de datos iniciada en 0.1 s.

Mediante esta prueba, se encontró que al mover la ventana de datos a 0.1 s, el error incrementa notablemente. Por lo anterior, se puede decir que la ventana de datos que se seleccione influye sobre el resultado del algoritmo. Se debe escoger entonces, una ventana de datos en la que las corrientes de cortocircuito del sistema sean estables, o bien, sufran pequeños cambios.

4.3.3. Método propuesto

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por el método propuesto en esta tesis.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Resistencia estimada [Ω]	Error en distancia [%]
100	0	100.051368	-0.004392	0.051368
	50	99.785178	50.01879	-0.214822
	100	99.784658	100.017499	-0.215342
500	0	500.635112	0.002692	0.127022
	50	500.032732	50.000643	0.006546
	100	500.010716	99.999934	0.002143
900	0	902.182259	0.003547	0.242473
	50	900.444445	49.999479	0.049383
	100	900.089135	100.001377	0.009904

Tabla 4.7: Resultados del método propuesto.

Como se observa en la tabla anterior, el error máximo presente en estas pruebas es de 0.242473 %, lo que demuestra que el método desarrollado en este trabajo es de gran precisión.

La variante realizada en las pruebas a este método, es el tiempo de duración de la falla, que fue modificado a 0.1 s, y se llevó a cabo para una falla a 100 km con una resistencia de 50 Ω . La Tabla 4.8 muestra el resultado de esta prueba.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Resistencia estimada [Ω]	Error en distancia [%]
100	50	98.211804	50.159179	-1.788196

Tabla 4.8: Resultado para la falla de duración de 0.1 s.

La anterior tabla indica, que en la prueba realizada se vio afectado el método propuesto por el cambio de duración de la falla, incrementando el error de -0.214822 % a -1.788196 %.

Pruebas adicionales

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del método para diferentes tipos de fallas, se realizaron pruebas para fallas polo-polo en el sistema descrito en 4.1, y para fallas polo-tierra en un sistema monopolar.

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos para las fallas polo-polo sobre el sistema de prueba descrito en 4.1.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Error en distancia [%]
100	0	100.648227	0.648227
	50	99.854407	-0.145593
	100	99.545229	-0.454771
500	0	501.188438	0.237688
	50	500.109483	0.021897
	100	500.002377	0.000475
900	0	904.818421	0.535380
	50	901.255305	0.139478
	100	900.367265	0.040807

Tabla 4.9: Resultados del método propuesto para fallas polo-polo.

El error máximo presente en estas pruebas es de 0.648227 %, lo que indica que el método propuesto funciona correctamente para fallas polo-polo.

Las pruebas para las fallas polo-tierra en un sistema monopolar, se realizaron sobre una línea de 1000 km, con tensión nominal de 500 kV y los mismos datos de conductor y de terreno del sistema de prueba descrito en 4.1. La altura del conductor respecto al suelo es también de 30 m. Los resultados para estas pruebas se muestran en la Tabla 4.10.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Distancia estimada [km]	Resistencia estimada [Ω]	Error en distancia [%]
100	0	99.906974	0.008545	-0.093026
	50	100.156640	49.985823	0.156640
	100	100.186724	99.983748	0.186724
500	0	500.653013	0.001631	0.130603
	50	500.045148	49.999420	0.009030
	100	499.999751	100.000059	-0.000050
900	0	902.139639	0.000000	0.237738
	50	900.459111	49.996152	0.051012
	100	900.086832	99.998893	0.009648

Tabla 4.10: Resultados del método propuesto para fallas polo-tierra en un sistema monopolar.

En la tabla anterior se observa que el método propuesto obtiene resultados precisos también para fallas en sistemas monopolares, presentando un error máximo de 0.237738 %.

4.4. Comparación entre métodos

Con el fin de ilustrar gráficamente los resultados obtenidos en las pruebas a cada método, se muestra de forma comparativa los errores que estos presentaron. En la Tabla 4.11 se le asignan nombres a las fallas que se simularon sobre el sistema de prueba, y en la Figura 4.7 se muestra una comparación de errores entre los métodos para cada falla.

Distancia a la falla [km]	Resistencia de falla [Ω]	Nombre
100	0	Falla 1
	50	Falla 2
	100	Falla 3
500	0	Falla 4
	50	Falla 5
	100	Falla 6
900	0	Falla 7
	50	Falla 8
	100	Falla 9

Tabla 4.11: Asignación de nombres a las fallas.

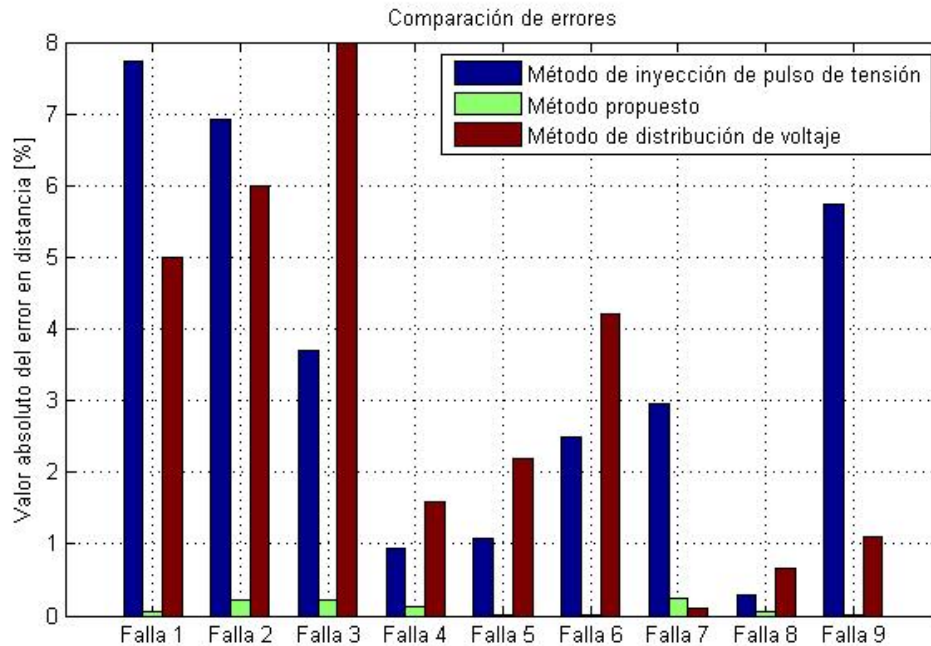


Figura 4.7: Comparación de errores obtenidos por los métodos para cada falla.

Es válido decir que el método desarrollado en este trabajo presenta errores considerablemente menores a los errores de los otros dos métodos. Solo en la Falla 7 el error del método propuesto no es el menor, y coincide con el error máximo obtenido por este método para las fallas polo-tierra en el sistema bipolar.

Adicionalmente, en la Figura 4.8 se muestra una comparación de las distancias estimadas por cada método, permitiendo visualizar mejor lo ilustrado en la Figura 4.7.

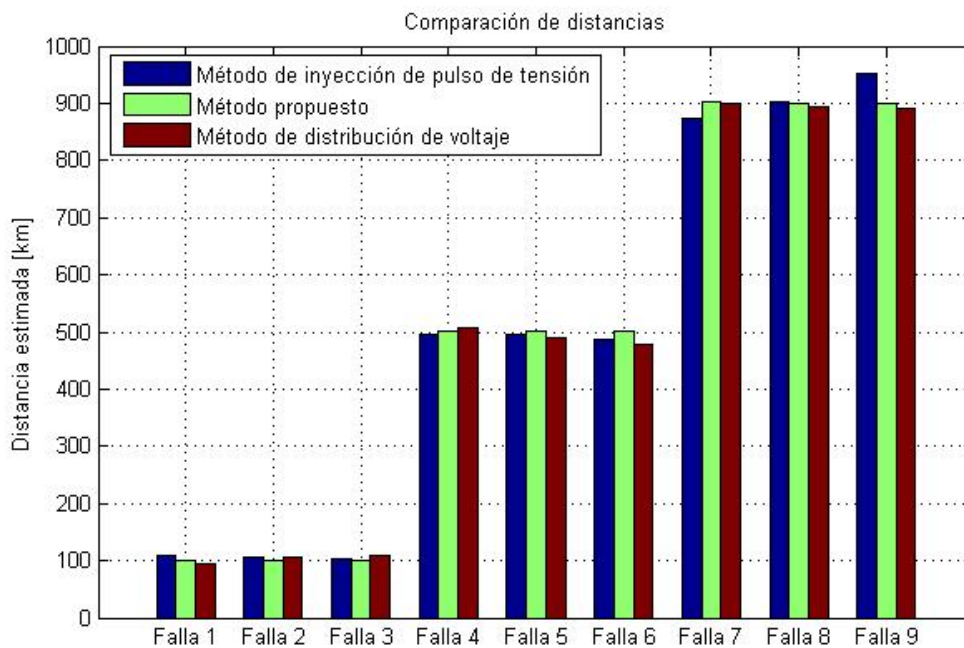


Figura 4.8: Comparación de distancias estimadas por los métodos para cada falla.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones generales

Las fallas en las líneas de transmisión deben solucionarse rápidamente, ya que traen consigo grandes problemas. Estos problemas pueden ser desconexiones prolongadas de las cargas, sobrecargas en otras líneas, daños en equipos, y penalizaciones para los operadores de red por parte de las empresas reguladoras. Si se conoce la ubicación de la falla, es posible actuar con prontitud para restaurar el sistema.

Los métodos para localizar fallas son un factor importante en la elaboración de líneas de transmisión, si se desea contar con un alto nivel de calidad de energía. Sin embargo, la implementación de dichos métodos generan costos para el operador de red. Los métodos menos costosos son los que necesiten el menor número de elementos instalados en la red, como lo son los métodos basados en el modelo de la línea usados en sistemas AC, que utilizan los datos adquiridos por los medidores de tensión y de corriente del sistema de transmisión. En sistemas HVDC existen pocos métodos con estas características, debido a la dificultad

para adaptarlos a estos sistemas que no poseen frecuencia fundamental.

El método de inyección de pulso de tensión, es un método basado en la impedancia de la línea, parecido a los métodos desarrollados para las líneas AC. Sin embargo, utiliza un aparato adicional que genera el pulso de tensión necesario para su ejecución. El método de distribución de voltaje utiliza las mediciones de tensión y de corriente en los dos extremos de la línea, adoptando un modelo de línea en el dominio del tiempo. Ambos métodos se basan en el modelo de la línea, y presentan un grado de exactitud similar. No obstante, para obtener el grado de exactitud obtenido en las pruebas, en este trabajo se modificó, para ambos métodos, una ecuación incorrecta.

El método desarrollado en este trabajo, utiliza mediciones de tensión y de corriente en ambos extremos de la línea, y el análisis circuital se realiza teniendo en cuenta sólo las componentes resistivas del sistema. Este método presenta un alto grado de exactitud, que es mucho mayor a los de los dos métodos analizados (método de inyección de pulso de tensión y método de distribución de voltaje). Así pues, en esta tesis se generó un nuevo y óptimo método para localizar fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía, con un bajo porcentaje de error y con la capacidad de localizar cualquier falla de tipo paralelo.

5.2. Futuros trabajos de investigación

De acuerdo a lo realizado en este trabajo y a los resultados obtenidos, los futuros trabajos propuestos son:

- Proponer una mejora al método de inyección de pulso de tensión, para que la exactitud del método no dependa de la frecuencia seleccionada.

- Desarrollar un método que utilice mediciones de tensión y de corriente sólo en un extremo de la línea de transmisión, evitando la necesidad de comunicación entre los dos extremos para ser ejecutado.
- Mejorar la exactitud del método propuesto ante fallas de corta duración.

Bibliografía

- [1] M. Flórez, J. José *et al.*, *Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento*. Universitat de Girona, 2006.
- [2] H. A. Al Hassan, “Fault location identification for a vsc-hvdc system with a long hybrid transmission medium,” Ph.D. dissertation, University of Pittsburgh, 2014.
- [3] I. D. Bautista Barajas and A. González Galeano, “Modelado y simulación de un sistema de transmisión en corriente directa,” 2008.
- [4] L. d. A. de Freitas, “Time-domain impedance-based fault location for hvdc transmission lines,” Ph.D. dissertation, Universidade do Porto, 2013.
- [5] M. Shukr, D. W. Thomas, and P. Zanchetta, “Vsc-hvdc transmission line faults location using active line impedance estimation,” in *Energy Conference and Exhibition (ENERGY-CON), 2012 IEEE International*. IEEE, 2012, pp. 244–248.
- [6] J. Suonan, S. Gao, G. Song, Z. Jiao, and X. Kang, “A novel fault-location method for hvdc transmission lines,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 2, pp. 1203–1209, 2010.

- [7] Z. Pan, L. Zhang, X. Wang, H. Yao, L. Zhu, Y. Liu, and X. Wen, “Hvdc ground return current modeling in ac systems considering mutual resistances,” 2015.

Capítulo 6

Anexos

6.1. Anexo I: Diagramas de flujo

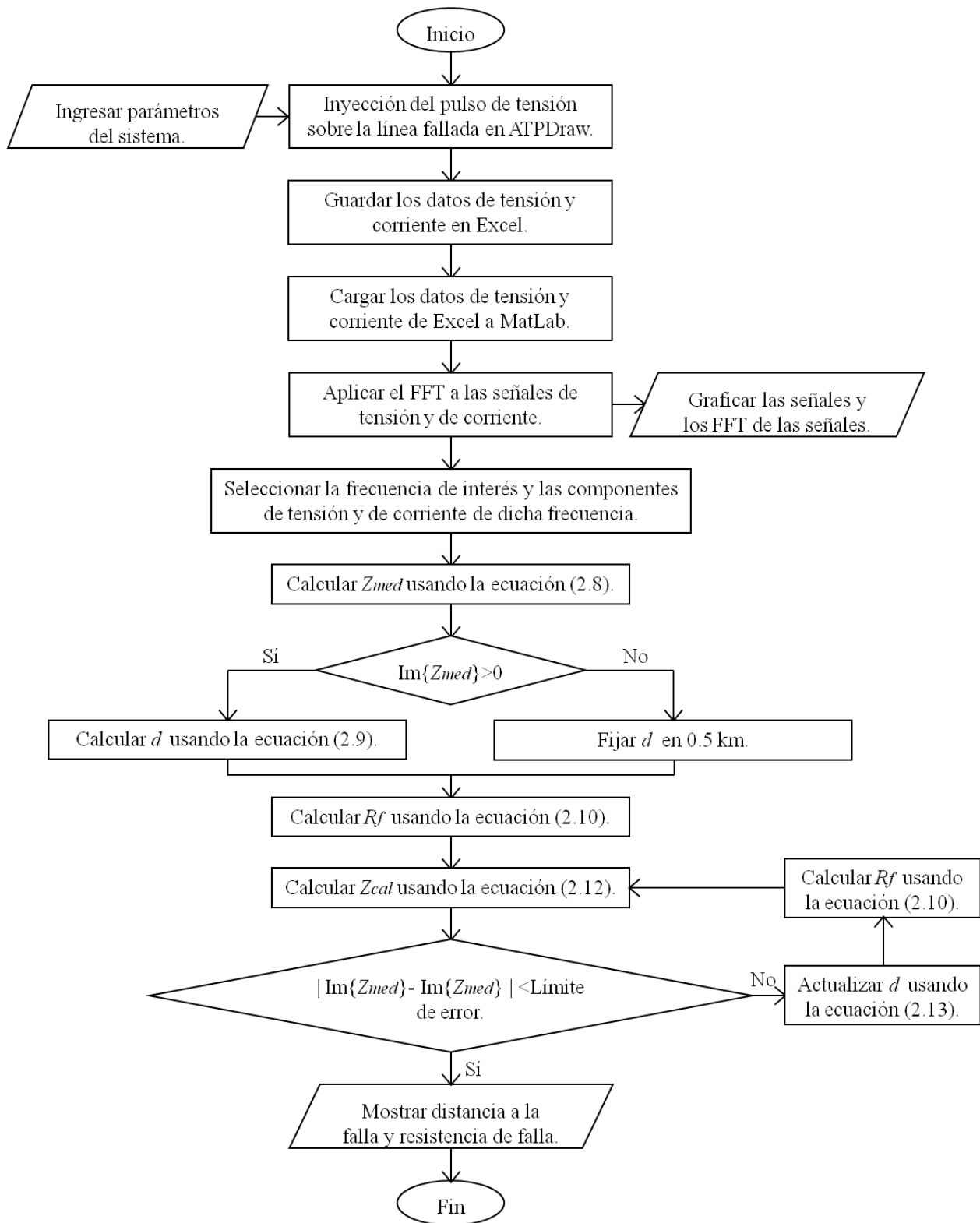


Figura 6.1: Diagrama de flujo de la implementación del método de inyección de pulso de tensión.

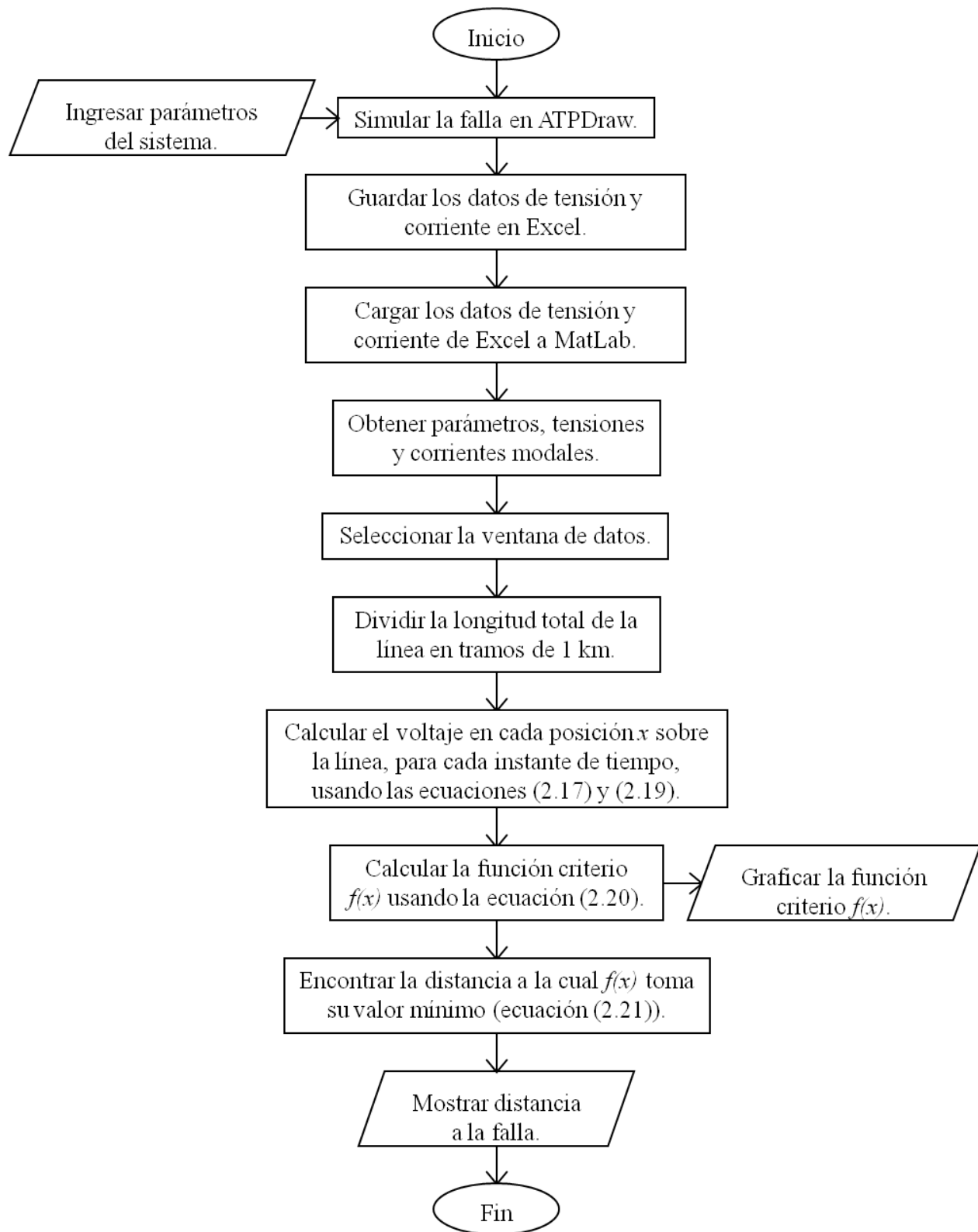


Figura 6.2: Diagrama de flujo de la implementación del método de distribución de voltaje.

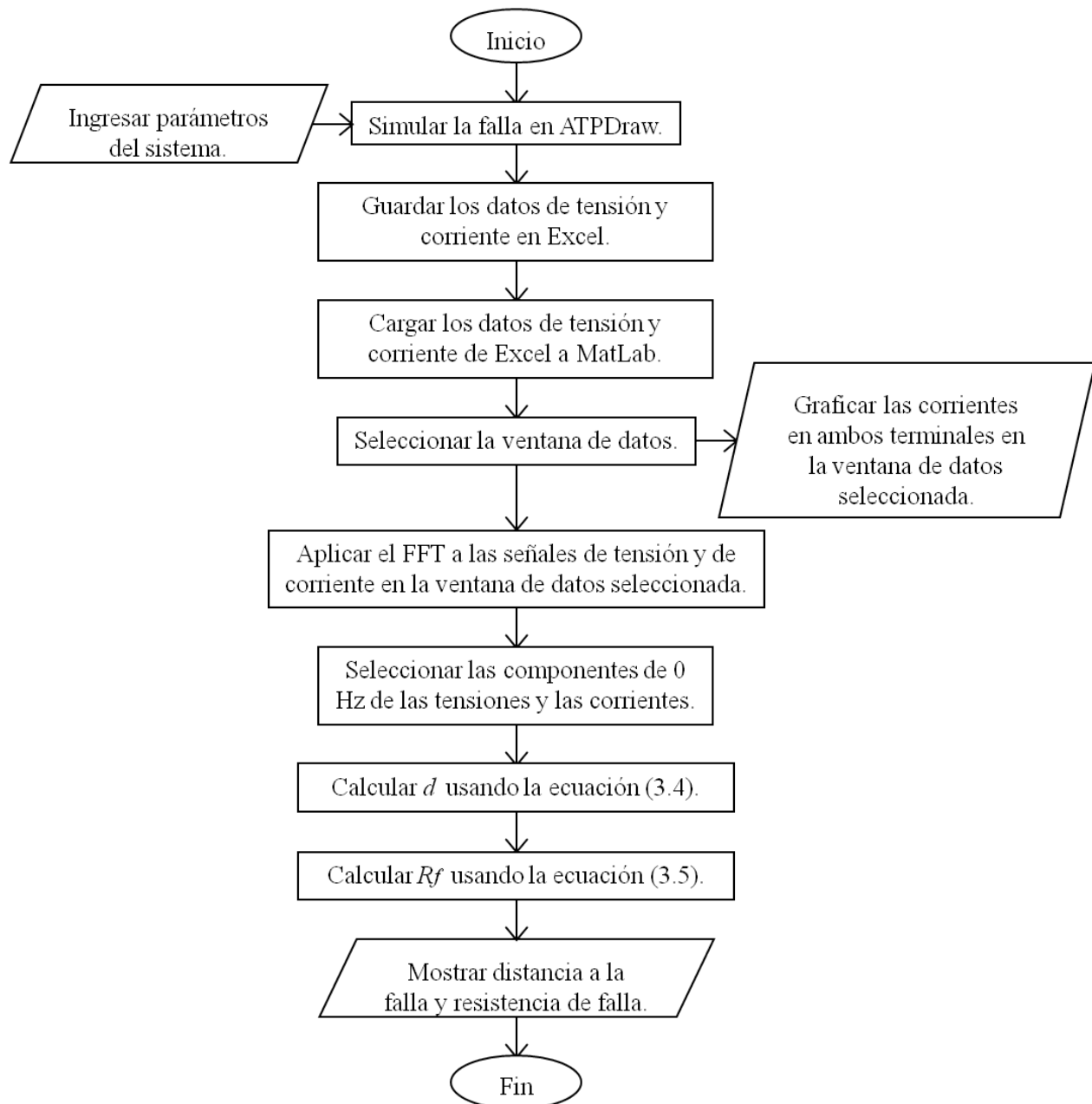


Figura 6.3: Diagrama de flujo de la implementación del método propuesto.